



TEKNILLINEN KORKEAKOULU  
Sähkö- ja tietoliikennetekniikan osasto  
Optoelektroniikan laboratorio

**Antti Kaikkonen**

## **LÄPINÄKYVÄ KAUPUNKIALUEEN AALLONPITUUSKANAVOITU RENGASVERKKO**

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkistettavaksi diplomi-insinöörin tutkintoa varten  
Espoossa 2.12. 2002

Työn valvoja    Professori Matti Leppihalme  
Työn ohjaaja    DI Mikko Söderlund

Tekijä:	Antti Kaikkonen
Työn nimi:	Läpinäkyvä kaupunkialueen aallonpituuskanavoitu rengasverkko
Päivämäärä:	2.12.2002 Sivumäärä: 79
Osasto:	Sähkö- ja tietoliikennetekniikan osasto
Professuuri:	S-104 Optoelektronikka
Työn valvoja:	Professori Matti Leppihalme
Työn ohjaaja:	DI Mikko Söderlund
Tiivistelmä:	<p>Tässä työssä on tarkasteltu läpinäkyvän WDM-verkon soveltuvuutta kaupunkialueelle. Erityistä huomiota on kiinnitetty uusimpiin komponenttiteknologioihin sekä kaupunkiverkostoinnin erityispiirteisiin. Työn ohessa on rakennettu kokeellinen kaupunkialueen aallonpituuskanavoitu rengasverkko. Verkon suunnittelun lähtökohtina ovat olleet kustannustehokkuus ja verkon skaalattavuus.</p> <p>Koeverkko koostuu kahdesta rinnakkaisesta kuidusta ja neljästä solmupisteestä. Datan siirtoon käytetään kahdeksaa staattista aallonpituutta ja 2,5 Gb/s bittinopeutta. Läpinäkyvyys on toteutettu optisten kaistanpäästösuodattimien ja multipleksereiden avulla. Realististen solmuvälien ja optisen (1+1)-suojauksen johdosta verkossa joudutaan käyttämään myös optista vahvistusta. Demonstroitu verkko on luonteeltaan syöttöverkko, joka tulee sijoittumaan kaupunkialueelle tilaajalähiverkon ja runkoverkon välille. Läpinäkyvyyden synnyttämä etu juuri tälle kyseiselle alueelle on mm. verkon vaivaton skaalattavuus.</p> <p>Koeverkon suorituskykyä on tutkittu mittaamalla verkossa siirrettävän liikenteen bitti- ja tavuvirhettä. Kuva signaalin laadusta on toisaalta saatu myös sammutussuhteen muuttumisena silmäkuviomittauksilla. Tavuvirhemittauksissa on käytetty tavoitetasona virhesuhdetta <math>10^{-9}</math>, jolloin kaikkien kanavien mitatut herkkyysluononnukset ovat välillä 0,1-2 dB:ä.</p> <p>Avainsanat: kaupunkialue, aallonpituuskanavoitu, läpinäkyvyys, herkkyysluononnus, sammutussuhde, skaalattavuus, kustannustehokkuus, optinen suojaus</p>

Auhor:	Antti Kaikkonen	
Title of thesis:	Transparent metropolitan area WDM ring network	
Date:	2.12.2002	Pages: 79
Department:	Department of Electrical and Communications Engineering	
Chair:	S-104 Optoelectronics	
Supervisor:	Professor Matti Leppihalme	
Instructor:	M.Sc. Mikko Söderlund	
<b>Abstract:</b> <p>This thesis examines how well a transparent WDM network is applicable to the metropolitan area. The main attention has been paid to state-of-the-art component technologies and special characteristics of metropolitan area networking. As part of the thesis, an experimental setup for wavelength division multiplexed ring network was built. The baseline for planning the network was cost-efficiency and scalability.</p> <p>The test bed is made of two parallel fibers and four nodes. Eight static wavelengths and 2,5 Gb/s bit rate are used to transfer data. Transparency is achieved by using optical bandpass filters and multiplexers. To achieve realistic node spacing and optical (1+1) protection, optical amplifiers are used in the demo network. The demonstrated network is an access feeder network, which will be placed between a metropolitan area distribution network and a backbone network. A key benefit of transparency in this particular area is, for example, the smooth scalability of the network.</p> <p>The performance of the demo network was studied by measuring bit and byte-error rates of traffic. Signal quality was also studied by measuring extinction ratio from eye-diagram measurements. The reference level of power penalty measurements was error rate <math>10^{-9}</math>, when all channels penalties were between 0,1-2 dB.</p> <p><b>Keywords:</b> metropolitan area, wavelength division multiplexing, transparency, power penalty, extinction ratio, scalability, cost-efficiency, optical protection</p>		

## Alkusanat

Tämä diplomityö on tehty fotonikan tutkimusryhmässä VTT mikroelektroniikkakeskuksessa. Diplomityön valvojana on toiminut professori Matti Leppihalme, jolle esitän parhaat kiitokseni.

Diplomityön ohjaajana on toiminut Mikko Söderlund. Haluankin kiittää Mikkoa erittäin mielenkiintoisesta diplomityöaiheesta ja mahdollisuudesta työskennellä fotonikan tutkimusryhmässä. Lisäksi haluan kiittää häntä hedelmällisestä yhteistyöstä, työn sisältöön kohdistuneista mielipiteistä sekä kaikesta muusta arvokkaasta palautteesta. Haluan kiittää myös koko fotonikan ryhmää kivan ja toimivan tutkimusilmapiirin luomisesta. Työni kieliasun parantamisesta kuuluu erityismaininta Iirolle ja Joonalle.

Rakkaat kiitokset myös kotijoukoilleni, jotka ovat Kajaanista asti henkisesti ja taloudellisesti tukeneet allekirjoittaneen valmistumista. Kiitokset myös kaikille ystävilleni ja erityisesti Mariialle, jonka humanististen ajatusten vaikutusta työn sisältöön ei osaa sanoa kuvata☺

Otaniemessä, 13. marraskuuta 2002



Antti Kaikkonen



# Sisällysluettelo

<b>TIIVISTELMÄ.....</b>	<b>II</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>III</b>
<b>ALKUSANAT.....</b>	<b>IV</b>
<b>SISÄLLYSLUETTELO.....</b>	<b>V</b>
<b>LYHENNELUETTELO .....</b>	<b>VII</b>
<b>SYMBOLILUETTELO .....</b>	<b>VIII</b>
<b>1 JOHDANTO.....</b>	<b>1</b>
<b>2 OPTISEN TIETOLIIKENTEEEN KEHITYS.....</b>	<b>3</b>
2.1 ENSIMMÄISEN SUKUPOLVEN OPTISET VERKOT.....	3
2.2 SIIRTYMINEN SEURAAVAN SUKUPOLVEN OPTISIIN VERKKOIHIN.....	6
<b>3 KUITUOPTISEN TIEDONSIIRRON FYSIKAALINEN PERUSTA .....</b>	<b>9</b>
3.1 VAIMENNUS JA VAHVISTUS.....	11
3.2 DISPERSIO.....	14
3.3 VISERRYS .....	15
3.4 EPÄLINEAARISET OPTISET ILMIÖT.....	16
3.5 BITTIVIRHESUHDE JA HERKKYYSHUONONNUS.....	17
3.6 TEHOBUJETTI.....	18
3.7 YLIKUULUMINEN.....	18
3.7.1 Kanavien välinen ylikuuluminen.....	19
3.7.2 Kanavan sisäinen ylikuuluminen.....	20
<b>4 OPTISET KAUPUNKIALUEEN WDM-VERKOT .....</b>	<b>22</b>
4.1 VERKKOARKKITEHTUURIT.....	24
4.1.1 Kaksipisteyhteys (point-to-point).....	25
4.1.2 Lähetysverkko (broadcast-and-select).....	25
4.1.3 WDM-moniliittymäverkot (multiple-access).....	25
4.2 VERKON HALLINTA JA SUOJAUS.....	26
4.3 WDM-KOMPONENTTEJA .....	28
4.3.1 Optinen kuitu.....	29
4.3.2 Lähettimet.....	32

4.3.3	Vastaanotin.....	35
4.3.4	Kytkimet.....	36
4.3.5	Optiset vahvistimet.....	37
4.3.6	Optiset suodattimet.....	42
4.3.7	Vuoroerotin ( <i>interleaver</i> ) .....	43
4.3.8	Isolaattori ja sirkulaattori.....	44
4.3.9	Optiset kanavien lisäys/pudotuskomponentit ja ristikytkimet.....	45
<b>5</b>	<b>KOKEELLISIA WDM-KAUPUNKIVERKKOJA .....</b>	<b>46</b>
5.1	DISPERSIOSIIRRETTY KUITU KAUPUNKIALUEEN WDM-VERKOSSA.....	46
5.2	KOMNET: DYNAAMINEN KAUPUNKIALUEEN DWDM-VERKKO.....	48
5.3	NGI ONRAMP: SEURAAVAN SUKUPOLVEN UUELLEENJÄRJESTYVÄ WDM-TILAAJAVERKKO..	50
<b>6</b>	<b>VERKKODEMONSTRAATIO .....</b>	<b>52</b>
6.1	VERKON RAKENNE.....	52
6.1.1	Lähetinkortit.....	53
6.1.2	Linjaterminaalit.....	54
6.1.3	Keskitin .....	56
6.1.4	Verkon dynaaminen laajennus.....	58
6.2	MITTAUKSET JA TULOKSET.....	59
6.2.1	Vaimennusmittaukset.....	59
6.2.2	Silmäkuviomittaukset.....	60
6.2.3	Bittivirhemittaukset.....	61
<b>7</b>	<b>YHTEENVETO.....</b>	<b>65</b>
<b>A</b>	<b>KOEVERKON OPTINEN TEHOBUJETTI .....</b>	<b>67</b>
	<b>LÄHDELUETTELO.....</b>	<b>68</b>

## Lyhenneluettelo

$\mu\text{m}$	mikrometri, $10^{-6}$ metriä
ASE	<i>amplified spontaneous emission</i> , vahvistunut spontaani emissio
ATM	<i>asynchronous transfer mode</i> , asynkroninen toimintamuoto
AWG	<i>arrayed waveguide grating</i>
BER	<i>bit-error rate</i> , bittivirhesuhde
CATV	<i>common-antenna (cable) television</i> , kaapeli-TV
dB	desibeli
DBR	<i>distributed Bragg reflector</i> , laser-rakenne, jota käytetään säädettävissä lasereissa.
DFB	<i>distributed feedback</i> , jaettu takaisinkytkentä
CSMA/CD	<i>carrier sense multiple access with collision architecture</i> , Ethernet-protokollassa käytetty kilpailukäytäntö.
CWDM	<i>coarse WDM</i> , karkea WDM. Systeemi, jossa yhdessä kuidussa siirretään vain muutamaa aallonpituutta (esim. $1,30\mu\text{m}$ ja $1,55\mu\text{m}$ ). Tekniikkaa voidaan käyttää myös yhdessä DWDM:n kanssa kanavaryhmien allokointiin.
DWDM	<i>dense WDM</i> , hienojakoinen WDM. Systeemi, jossa useita kanavia siirretään tiheällä kanavienvälillä yhdessä kuidussa.
EDFA	<i>erbium-doped fiber amplifier</i> , erbiiumkuituvahvistin
Gb/s	miljardia bittiä sekunnissa
GHz	gigahertsi, $10^9$ hertsiä
Hz	hertsi, taajuuden yksikkö
I/O	<i>input-output</i> , siirräntä
IP	<i>internet protocol</i> , TCP/IP-perheen verkkokerroksen protokolla
ISDN	<i>integrated services digital network</i> , integroitu palveluverkko
km	kilometri
LAN	<i>local area network</i> , lähialueen verkko
Laser	<i>light amplification by stimulated emission of radiation</i>
MAN	<i>metropolitan area network</i> , kaupunkialueen verkko
Mb/s	miljoonaa bittiä sekunnissa
mW	$10^{-3}$ wattia
nm	nanometri, $10^{-9}$ metriä
NRZ	<i>non-return to zero</i>
OAN	<i>optical access networking</i>
OTDM	<i>optical time division multiplexing</i> , optinen aikajakoinen kanavointi
PDH	<i>plesiochronous digital hierarchy</i> , plesiochroninen digitaalinen hierarkia
PDL	<i>polarization-depnt loss</i> , polarisaation aiheuttama vaimennus

ppm	<i>parts per million</i> , osaa miljoonasta. Tiheyden yksikkö
RZ	<i>return to zero</i>
s	sekunti
SDH	<i>synchronous digital hierarchy</i> , synkroninen digitaalinen hierarkia. Euroopan vastine amerikkalaiselle SONET:lle.
SNR	<i>signal-to-noise ratio</i> , signaali-kohinasuhde
SOA	<i>semiconductor optical amplifier</i> , puolijohdevahvistin
SONET	<i>synchronous optical network</i> , synkroninen optinen verkko
TCP/IP	<i>transmission control protocol/internet protocol</i> , siirronkollointi/internet protokolla. Yleinen tietoliikenteessä käytetty protokollaperhe.
TDM	<i>time division multiplexing</i> , aikajakoinen kanavointi
UPPR	<i>unidirectional path-protected ring</i> , WDM-rengasverkoissa käytetty suojausarkkitehtuuri.
WAN	<i>wide area network</i> , suuralueverkko
WDM	<i>wavelength division multiplexing</i> , aallonpituuskanavointi

## Symboliluettelo

$\beta_2$	ryhmänopeusdispersioparametri
$\varepsilon$	ylikuulumistaso
$\eta$	kvanttihyötysuhde
$\varphi_s$	datasignaalin vaihe
$\varphi_x$	ylikuuluvan signaalin vaihe
$\lambda_s$	signaalin aallonpituus
$\lambda_p$	pumppusignaalin aallonpituus
$\nu_s$	signaalin taajuus
$\sigma_0$	0-pulssin keskihajonta
$\sigma_1$	1-pulssin keskihajonta
A	vaimennus
B	bittinopeus
$b_s$	datasignaalin määräämä binaarifunktio
$b_x$	ylikuuluvan signaalin määräämä binaarifunktio
C	lineaarinen viserrys
$C_1$	kanavan kokonaishäviöt
c	valon nopeus, $2,99 \times 10^8$ m/s
D	dispersioparametri
$F_n$	kohinaluku
$G(\nu_s)$	vahvistus
$g(\nu_s)$	vahvistuskerroin



$I_0$	0-pulssin fotovirran keskiarvo
$I_1$	1-pulssin fotovirran keskiarvo
$I_x$	ylikuuluvan signaalin synnyttämä fotovirta vastaanottimessa
$I_k$	tutkittavan kanavan synnyttämä fotovirta vastaanottimessa
$L$	kuidun pituus
$M_s$	systeemin marginaali
$N_1$	atomin perustilan populaatio
$N_2$	atomin viritystilan populaatio
$n_{sp}$	populaatioinversiotekijä
$P$	optinen teho
$P_0$	0-bitin tehotaso
$P_1$	1-bitin tehotaso
$P_{mm}$	laserin päämuodon teho
$P_{rec}$	vastaanottimen herkkyys
$P_{sm}$	laserin dominoivimman sivumuodon teho
$P_{tr}$	lähetysteho
$P_x$	ylikuuluvan signaalin teho
$P(0,1/1,0)$	ehdollinen bittivirhetodennäköisyys
$p(0)$	0-pulssin lähetystodennäköisyys
$p(1)$	1-pulssin lähetystodennäköisyys
$p_p$	herkkyysluonnonus
$Q$	Personickin Q-tekijä
$R$	responsiviteetti
$r_{ex}$	sammutussuhde
$T_0$	pulssin leveys 1/e-intensiteetti pisteessä
$t$	aika
$v_g$	ryhmänopeus

## 1 Johdanto

Uudet kehittyneet komponenttitekniikat ja internetliikenteen kasvu ovat viime vuosina johtaneet optisten tiedonsiirtoverkkojen nopeaan kehitykseen. Oman osansa tästä huimasta kehityksestä ovat saaneet myös kaupunkialueen verkot, joissa on osittain siirrytty käyttämään WDM-tekniikkaa (*wavelength division multiplexing*). WDM-tekniikassa yhteen kuituun kanavoidaan useita aikajakoisia signaaleja eri aallonpituuksille. WDM-teknologia mahdollistaa läpinäkyvät verkkoratkaisut, joilla tilaajien alati kasvava kapasiteettitarve voidaan tyydyttää. Läpinäkyvyydellä tarkoitetaan tässä yhteydessä sitä, että verkon fyysinen taso ei ota kantaa siirrettävän datan bittinopeuteen eikä koodausmuotoon. Kasvavan kapasiteettitarpeen synnyttävät uudet laajakaistaiset multimediapalvelut, kuten videokonferenssit, etäläsnäolo, puheen siirtäminen IP-protokollassa, digi-TV ja langattoman viestinnän tukipalvelut. Lisäksi WDM-tekniikka tekee verkon rakenteesta joustavamman ja verkon päivittäminen yksinkertaistuu, sillä tekniikan avulla esimerkiksi verkon resurssien jakaminen yksinkertaistuu.

Tilaajien huimat vaatimukset ovat myös tämän työn motivaationa ja työssä on tarkoitus selvittää WDM-rengasverkon soveltuvuus kaupunkialueelle. Työssä paneudutaan eri komponenttitekniologioihin, esitellään joitain aiheesta tehtyjä tutkimuksia sekä toteutetaan kokeellinen kaupunkialueen WDM-verkko. Toteutettava verkko on kustannustehokas ja periaatteeltaan melko yksinkertainen.

Verkkomaailmassa käydään taistelua operaattoreiden kesken verkon suorituskyvystä, luotettavuudesta, joustavuudesta ja hinnasta. Voittaja on se, joka takaa kustannustehokkaimman ja kehittyneimmän vaihtoehdon. Kaupunkialueella kilpailussa voidaan käyttää hyväksi ”sekoita ja sovita” ideaa. Tällöin uusi kehitetty palvelu kytketään olemassa olevaan verkkoon vain siinä tapauksessa, että potentiaalisten tilaajien synnyttämät tuotot kattavat palvelun aiheuttamat kustannukset. Tällainen menettelytapa voi kuitenkin pidemmän päälle käydä raskaaksi operaattoreille. Toinen ratkaisu on optisen tilaajaverkon (*access network*) toteuttaminen. Se olisi hyvä palvelualusta, sillä on vaikea tietää, millaiset palvelut tyydyttävät ihmisten tarpeet esimerkiksi viiden vuoden kuluttua. Optinen tilaajaverkko on kuitenkin tässä mielessä kaukaa viisas, sillä se voidaan suunnitella siten, että uusien asennettavien palvelujen aiheuttamat kustannukset minimoituvat.

Kaupunkialueen tilaajaverkko jaetaan kahteen erilliseen osaan: syöttöverkkoon (*feeder network*) ja jakeluverkkoon (*distribution network*) [Sal+99]. Syöttöverkko voi olla keskittimen (*hub*) välityksellä yhteydessä toiseen syöttöverkkoon tai runkoverkkoon. Jakeluverkko puolestaan

yhdistää syöttöverkon ja lähiverkon. Tässä työssä keskitytään nimenomaan optisen syöttöverkon toteuttamiseen.

Läpinäkyvässä optisessa WDM-verkossa siirrettävä signaali pysyy optisessa muodossa koko reitin datan lähtöpisteestä päätepisteeseen. Kaupunkialueen verkossa signaali voi kulkea usean välisolmupisteen sekä pitkien kuitusegmenttien kautta ennen kuin se saavuttaa sille määrätyn pääteterminaalin. Jotta signaali kulkisi tällaisen polun optisessa muodossa, tarvitaan välisolmuissa passiivisia ristikytkimiä. Pitkillä siirtopoluilla signaalia joudutaan mahdollisesti myös vahvistamaan, ja yleensä se tapahtuu optisten erbiumkuituvahvistimien (EDFA, *erbium doped fiber amplifier*) avulla. Optinen ristikytkin ja EDFA mahdollistavat ”läpinäkyvän” kytkemisen ja häviöiden kompensoimisen. Valitettavasti ristikytkin ja EDFA aiheuttavat siirrettävään signaaliin myös häiriöitä. Esimerkiksi kahden signaalin kulkiessa samanaikaisesti ristikytkimen läpi, tapahtuu signaalien välillä yleensä aina ylikuulumista. EDFA tuottaa ASE-kohinaa (*amplified spontaneous emission*), joka huonontaa systeemin signaali-kohinasuhdetta. EDFA:n vahvistuksen saturaatio- ja aallonpituusriippuvuus tekee puolestaan sen vahvistuksesta liikenneriippuvaisen stokastisen suureen (ei vain mittaustarkkuuden mielessä).

Kirjan sisältö on seuraava: Luvussa kaksi käydään lyhyesti läpi optisten verkkojen kehitys. Luvussa kolme tarkastellaan optiseen tiedonsiirtoon liittyviä fysikaalisia ilmiöitä. Luvussa neljä siirrytään tarkastelemaan kaupunkialueen verkostointia ja luvussa viisi esitellään kolme erilaista kaupunkialueen syöttöverkkoa. Luvussa kuusi demonstroidaan kokeellinen WDM-syöttöverkko. Lopuksi luvussa seitsemän on lyhyt yhteenveto pohdinnoista ja työn aikana syntyneistä kysymyksistä.



## 2 Optisen tietoliikenteen kehitys

Julkisen tiedonsiirtoverkon kehitys analogisesta siirrosta nykypäivään on ollut valtavaa ja viimeisten 30 vuoden aikana optinen tiedonsiirto on vallannut alaa sähköiseltä siirrolta. Syynä tähän ovat mm. optisen kuidun suuri kaistanleveys ja laserteknologioiden kehittyminen. Kuparikaapelin kaistanleveys laskee nopeasti 100 MHz:stä yli 1 kilometrin siirtoetäisyyksillä ja tällöin tarvitaan sähköisiä signaalitoistimia. Sitä vastoin optisen kuidun kaistanleveys on 25 000 GHz useiden kymmenien kilometrien siirtoetäisyydellä. Merkittävää on myös se, että optinen kuitu on korroosion kestävä sekä immuuni suhteellisen suurillekin sähkömagneettisille häiriöille.

Optisiin kuituihin perustuvien sovellusten kehityksen voidaan katsoa alkaneen Englannista, kun herrat Kao ja Hocman (Standard Telecommunication Laboratories) havaitsivat 1966 että kuidun taitekerrointa, ja sitä kautta kuidun muitakin ominaisuuksia, voidaan säädellä seostamalla kuituun epäpuhtauksia [Kao+66]. 1970 valmistettiin optinen askeltaitekertoiminen monimuotokuitu, jossa aallonpituudella 633 nm vaimennus oli alle 20 dB/km. 70-luvun alussa kehitys kiihtyi ja pian saavutettiin alle 4 dB/km vaimennus asteittaistaitekertoimisella monimuotokuidulla.

Tällä hetkellä nopeimpien demonstroitujen optisten verkkojen siirtonopeus on luokkaa 10 Tb/s ja siirtoon käytetään pääsääntöisesti yksimuotokuitua. Tämä nopeus mahdollistaa yli 20 miljoonaa samanaikaista kaksisuuntaista puhelua tai vastaavasti se mahdollistaa 90 000 normaalin tietosanakirjan siirtämisen sekunnissa.

### 2.1 Ensimmäisen sukupolven optiset verkot

Optiikka tuli tiedonsiirtoon mukaan 1976, kun USA:ssa otettiin käyttöön ensimmäinen puhelinverkon valokaapeli. Suomessa ensimmäinen valokaapeli otettiin käyttöön 1979. Ensimmäisen sukupolven optisista verkoista puhuttaessa tarkoitetaan systeemejä, joissa kuparikaapeli on korvattu optisella kuidulla ja informaation siirtoon käytetään vain yhtä aallonpituutta. Kehityksen alussa 70-luvun lopulla usein käytetty aallonpituus oli 0,8  $\mu\text{m}$  ja siirtoon käytettiin monimuotokuitua. Koaksiaalikaapeliverkkoihin verrattuna ensimmäisetkin optiset verkot olivat edistyksellisiä. Niissä saavutettiin bittinopeus 45 Mb/s ja signaalin sähköisten toistimien välinen etäisyys pystyttiin kasvattamaan kymmeneen kilometriin [Agr97].

80-luvulla myös rakennusten välisissä lähiverkoissa alettiin käyttää valokaapelia, joka oli aikaisemmin ollut vain suuralueverkkojen siirtotie. Siirtoetäisyyttä onnistuttiin yhä kasvattamaan 1980-luvun alussa, kun 1,3  $\mu\text{m}$ :n InGaAsP yhdistepuolijohdelaser kehitettiin.



Tällä aallonpituudella sijaitsi optisen kuidun paikallinen absorptiominimi, mutta bittinopeus oli edelleen rajoittunut alle 100 Mb/s. Rajoitus johtui monimuotokuidun voimakkaasta muotodispersiosta, joka myöhemmin ratkaistiin kehittämällä optinen yksimuotokuitu. Yksimuotokuidulla ja 1,3  $\mu\text{m}$  lähettimellä saavutettiin jo 80-luvun alussa 2 Gb/s siirtonopeus ja usean kymmenen kilometrin siirtoetäisyys. Siirtoetäisyys kasvoi edelleen, kun 80-luvun lopussa otettiin käyttöön aallonpituus 1,55  $\mu\text{m}$ , jolla sijaitsee kuidun absoluuttinen vaimennusminimi. Vuonna 1988 otettiin käyttöön ensimmäinen Atlantin valtameren alittava kuitulinkki, jossa käytettiin sähköistä signaalin uudistamista. 80-luvun lopussa ratkaistiin myös vaimennuksista aiheutuva etäisyysrajoitus, kun optinen erbiumkuituvahvistin esiteltiin [Mea+87]. Lisäksi bittinopeuden kasvun mahdollisti kapeakaistaisten DFB-lasereiden (*distributed feedback*) käyttöönotto.

Ensimmäisen sukupolven optisten verkkojen aikaan tiedonsiirron tärkein tarkoitus oli puheen siirtäminen. Puheen virheettömän siirron takaamiseksi kehitettiin tiedonsiirtoprotokollia ja tuolloin sai alkunsa mm. SONET (*synchronous optical network*). SONET on vielä nykyisinkin yleisesti käytetty suurinopeuksisten signaalien siirto- ja kanavointistandardi Pohjois-Amerikassa. SDH (synkroninen digitaalinen hierarkia) on SONET:iin läheisesti liittyvä standardi, joka on käytössä Japanissa ja Euroopassa. SONET/SDH kehitettiin ratkaisemaan aikaisemman PDH-standardin (plesiochroninen digitaalinen hierarkia) ongelmia. PDH kehitettiin aikanaan ensisijaisesti välineeksi kanavoida digitaalisia äänipiirejä. Analoginen äänipiiri, jonka kaistanleveys oli 4 kHz, voitiin näytteistää 8 kHz:llä ja kvantisoida kahdeksalla bitillä per näyte, jolloin saavutettiin digitaalisissa piireissä 64 kb/s siirtonopeus. Nopeammat bittivirrat saavutettiin tämän perusbittivirran monikertoina. Asynkronisen PDH:n käyttö aiheutti kuitenkin ongelmia mm. kanavointiin, sillä suurinopeuksisesta bittivirrasta oli hyvin vaikea erottaa hitaampia signaaleja. SONET:ssa ja SDH:ssa ongelma on korjattu yhdellä synkronoidulla ohjauskellolla, joka tahdistaa kaikkien bittivirtojen kellot täsmällisesti.

SONET/SDH standardit määrittelevät verkon fyysisen tason toteuttamistavat. Standardeissa määritellään siirtonopeudet (taulukko 1), aallonpituudet, tehotasot, sekä pulssi- ja koodausmuodot. Nykyiset standardit sisältävät myös täydellisen kuvauksen datakehysten rakenteesta. Standardit mahdollistavat eri valmistajien laitteiden verkkojen välisen liitännän. SONET/SDH sisältää lisäksi takuun palvelujen saatavuudesta. Takuun seurauksena verkon palautumisaika vian jälkeen SONET/SDH:ssa on alle 60 ms, kun PDH:ssa se oli normaalisti useita sekunteja tai jopa minuutteja [Ram+98].

**Taulukko 1. SONET/SDH bittinopeudet.**

SONET-signaali	SDH-signaali	Bittinopeus [Mb/s]
STS-1	-	51.84
STS-3/OC-3	STM-1	155.52
STS-12/OC-12	STM-4	622.08
STS-24/OC-24	-	1244.16
STS-48/OC-48	STM-16	2488.32
STS-192/OC-192	STM-64	9953.28

Pian SONET/SDH:n esittelemisen jälkeen 80-luvun lopussa sai laajan hyväksynnän laajakaistainen integroitu palveluverkko (B-ISDN). Sen tarkoitus oli tukea kaikenlaisia multimediasovelluksia julkisessa verkossa, koska pelkkä puheen siirtäminen ei enää riittänyt. 90-luvulla alettiin kehittämään ATM-protokollaa (asynkroninen toimintamuoto). Sen tarkoitus oli tarjota mm. siirtopalveluja B-ISDN:lle. ATM on solu-pohjainen siirtotekniikka, jossa käytetään määrätyn pituisia soluja. Nopeaa pakettikytkentää tukeva ATM soveltui hyvin multimediasovelluksiin, koska samaan aikaan kehitettiin myös nopeaa kytkintekniikkaa. ATM:n rinnalla jatkoi kehitystään ensimmäinen pakettikytkentäinen protokolla, IP eli internetprotokolla.

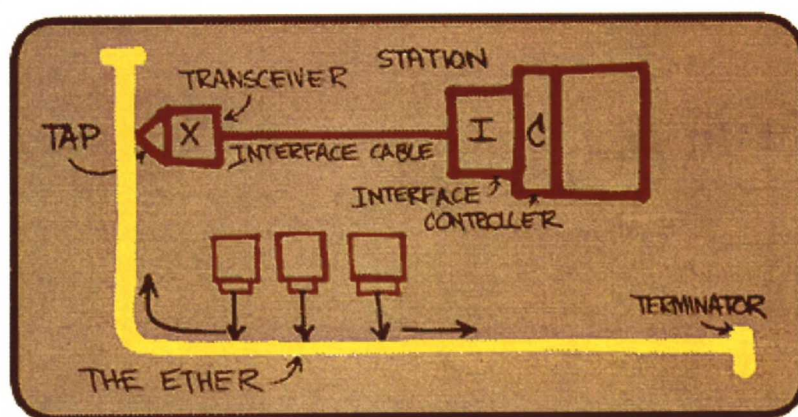
IP-verkossa liikkuvat solut, internetpaketit, ovat myös vaihtelevan pituisia, mutta yleensä ne ovat pidempiä kuin ATM-solut. IP-verkon reitittimien tehtävänä on tarkistaa saapuvat paketit, määrittää pakettien määränpään osoite, vertailla osoitteita reitittimeen varastoituun reittitauluun ja lähettää paketit oikeisiin ulostulolinkkeihin. IP ei kuitenkaan sisällä takuuta siitä pääseekö paketit perille. Tämä ongelma on jätetty sovellusten ratkaistavaksi. Toisaalta siirtoprotokolla TCP (*transmission control protocol*) on siirto-orientoitunut; TCP takaa sen, että bittivirrat saapuvat pääteterminaaliin oikeassa järjestyksessä. Jos paketti ei jostain syystä pääse perille, TCP ilmoittaa viasta sekä lähetin- että vastaanotinpuolelta. TCP/IP havaitsee lisäksi siirtolinkin mahdollisen ruuhkan, joten se mahdollistaa siirtonopeuden skaalattavuuden.

Esittelemättä on vielä yksi yleinen protokollaperhe, Ethernet. Ethernet on kaupallinen nimi, jota käytetään viitattaessa joukkoon lähiverkon toteuttamistapoja. Kriteerinä on, että niiden tulee toteuttaa likimain OSI-viitemallin (*open system interconnection*) kaksi alinta kerrosta (ks. luku 4.1). Kaikki Ethernetit välittävät verkossa koneiden välistä tietoa käyttäen kehyksiä. Tärkein yhteinen piirre eri Etherneteillä on niiden käyttämä yhteinen kilpakaäytäntö, CSMA/CD. Se on sääntöjoukko, joka määrää verkon osien toiminnan tilanteessa, jossa kaksi laitetta yrittää jakaa saman kommunikaatiotien eli kanavan samanaikaisesti (törmäys). Nimi Ethernet on peräisin juuri tuosta kommunikaatiotien jakamisesta, jossa ”ether” (etteri) viittaa kaikille yhteiseen



avaruuteen jossa data etenee. Ethernetissä laitteiden sallitaan havaita törmäys. Havaittuaan törmäyksen laite odottaa satunnaisen viiveajan ja yrittää sen jälkeen lähettää viestin uudelleen. Jos tämäkään ei onnistu, on seuraava viiveaika kaksi kertaa edellinen (*exponential back off*).

Ethernetin kehitystyö käynnistyi jo vuonna 1973 ja yhä edelleen se on käytössä. Kehityksen alusta tiedonsiirtonopeus on kasvanut 2.94 Mb/s:stä ja 1990-luvun lopussa siirryttiin jo gigabittien nopeuksiin. Gb-Ethernet on varteenotettava verkko-infrastruktuuri myös kaupunkialueelle [Mor01].



**Kuva 2-1.** Alkuperäinen R. Metcalfen kuvaus Ethernetin rakenteesta ja toiminnasta.

Ensimmäisen sukupolven optisissa verkoissa käytetään tiedonsiirtoon siis vain yhtä aallonpituutta. Kanavan kapasiteetin kasvattamiseen voidaan käyttää aikajakoista kanavointia TDM (*time division multiplexing*). TDM:ssä kasvatetaan bittinopeutta kanavoimalla nopeaan bittivirtaan useita hitaampia bittivirtoja. TDM:n heikkous on se, että se vaatii nopeaa (kallista) elektroniikkaa. Tällä hetkellä nopeimpien kaupallisesti saatavilla olevien TDM-systeemien siirtonopeus on 40 Gb/s.

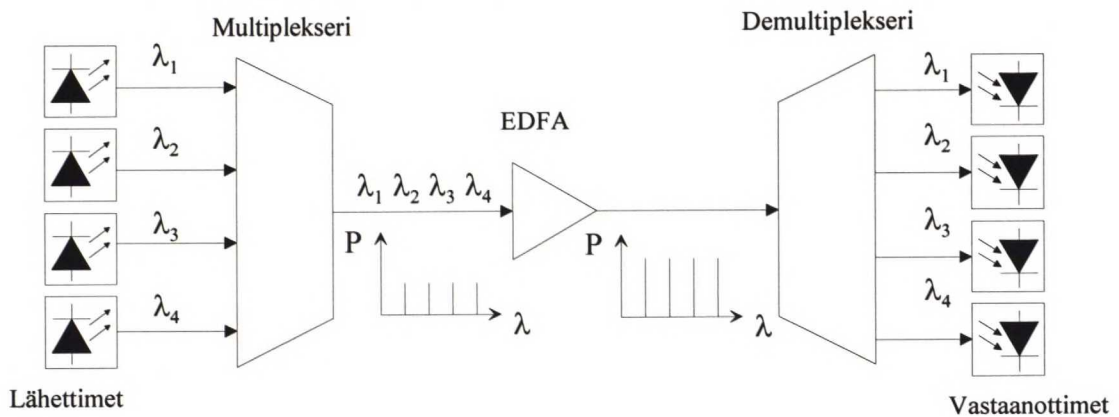
Ensimmäisen sukupolven optisissa verkoissa reitittäminen tapahtuu sähköisesti. Kun esimerkiksi SONET-kehys saapuu verkon solmupisteeseen, täytyy se muuttaa sähköiseen muotoon, jotta kehykseen sisällytetty pääteterminaalin osoite saadaan selville. Pitkillä siirtoetäisyyksillä tämä tarkoittaa sitä, että lähetetty valosignaali muutetaan sähköiseksi ja lähetetään uudelleen useaan kertaan.

## 2.2 Siirtyminen seuraavan sukupolven optisiin verkkoihin

90-luvun alussa kaistanleveyden tarve johti optisissa verkoissa aallonpituusjakaisen kanavoinnin käyttöönottoon. WDM on periaatteeltaan samanlainen kuin yli sata vuotta radiotekniikassa käytössä ollut taajuusjakoinen kanavointi. WDM:n idea on siirtää kuidussa samanaikaisesti

useita eri aallonpituuksia eli eri värisiä valosignaaleja ja pitää huoli siitä että signaalit eivät sekoitu. Eri aallonpituudet johdetaan yhteen kuituun multiplekserin avulla ja ne erotellaan vastaanotinpäässä demultiplekserin avulla (ks. kuva 2-2).

WDM-verkoissa signaalien sähköinen uudistaminen on raskasta ja se muodostuu helposti pullonkaulaksi verkon toimivuudelle. WDM-teknologian lopullisen soveltuvuuden optiseen tiedonsiirtoon mahdollistikin pitkälti vasta 80-luvun lopussa kehitetty optinen erbiumkuitu-vahvistin. EDFA:n avulla voitiin kaikki kuidussa siirrettävät aallonpituudet vahvistaa samanaikaisesti, eikä optista signaalia tarvinnut muuttaa enää sähköiseen muotoon ennen vahvistusta. EDFA:n, yksimuotokuidun ja kapeakaistaisen lähettimen avulla demonstroitiin jo 90-luvun alussa tuhansien kilometrien regeneroimattomia kaksipisteverkkoja, joissa voitiin käyttää usean gigabitin bittinopeutta [Agr97].



Kuva 2-2. WDM-tekniiikan idea.

Vielä 90-luvun puolenvälin tienoilla kanavien lisääminen ja pudottaminen toteutettiin sähköisten elementtien avulla. Tällöin verkon toimivuutta parannettiin optimoimalla käytettäviä sähköisiä komponentteja. Kanavien lisäämiseen ja pudottamiseen ja toisaalta koko verkon toimivuuteen saatiin parannus, kun verkoissa alettiin käyttää optisia kanavan lisäys/pudotuselementtejä, kuten heijastavia kuituhiloja ja optisia kaistanpäästösuodattimia. Myös muita fyysisen tason yläpuoleisia sähköisiä toimintoja voidaan siirtää ylemmiltä tasoilta verkon optiselle tasolle, jolloin verkon joustavuus kasvaa edelleen.

Poiketen ensimmäisestä sukupolvesta optiset verkot nähtiin nyt itsenäisenä fyysisenä tasona, jotka tarjoavat palveluja ylemmille sähköisille tasoille. Pyrkimyksenä on pitää signaali optisena mahdollisimman pitkään, jolloin raskasta sähköistä signaalin uudistamista tarvitaan mahdollisimman vähän. Kun WDM-verkon reititys tapahtuu optisessa muodossa, puhutaan aallonpituusreitityksestä tai yleisemmin täysin optisesta tai läpinäkyvästä verkosta. Reitityksellä on vain yksi rajoitus: kahdella optisen tason signaalilla, jotka jakavat saman optisen linkin, ei voi olla samaa aallonpituutta. Normaalityöinnässä tämä estetään jo verkon

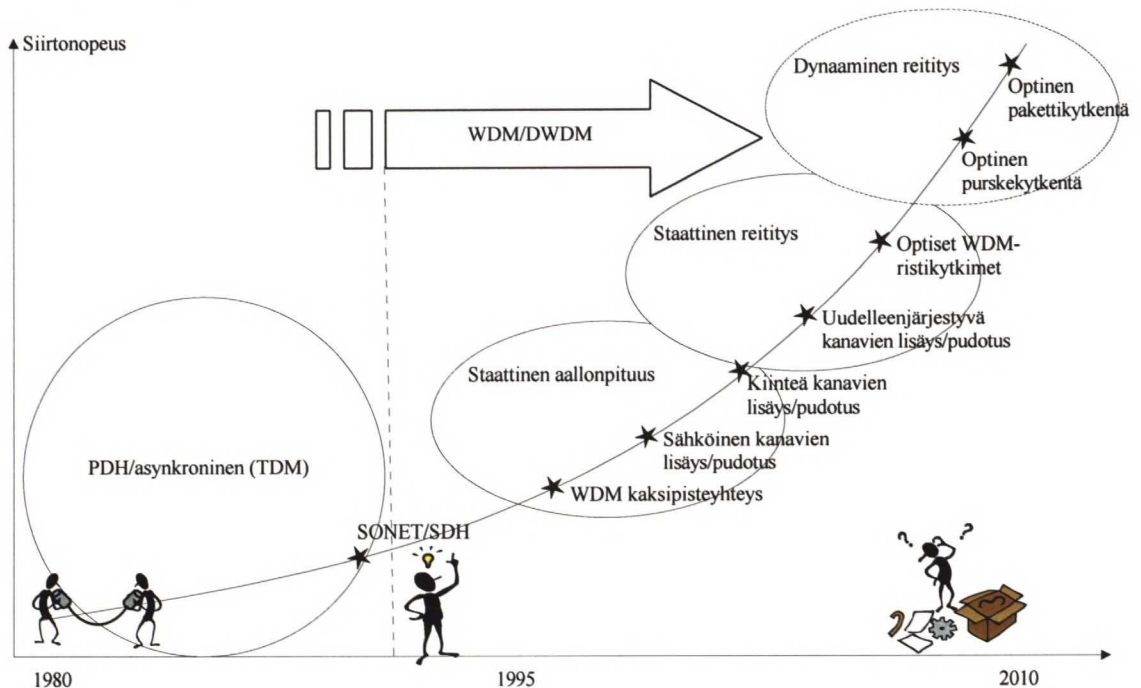


suunnitteluvaiheessa ja vian sattuessa aallonpituuksien lomittamisen hoitaa suojaus. Ensimmäiseksi aallonpituusreititettyjä verkkoja esittelivät Brain et al. [Bra+88] ja Hill [Hil88].

Läpinäkyvä optinen verkko sisältää yhteenliitettyjä solmuja, jotka voivat olla terminaaleja, kytkimiä tai molempia. Terminaali lähettää ja vastaanottaa signaalin sekä kytkee sisääntulo-signaalin suoraan yhteen tai useampaan ulostulolinkkiin. Data löytää sille määrätyn pääte-terminaalin lähetetyn signaalin aallonpituuden perusteella. Terminaalit, joille dataa ei ole tarkoitettu, päästävät sen lävitseen mahdollisimman pienillä kytkentä- ja läpivientihäviöillä.

WDM-tekniikan lisäksi tai sen yhteydessä voidaan käyttää optista aikajakoista kanavointia OTDM (*optical time division multiplexing*). OTDM:ssa multipleksointi ja demultipleksointi toteutetaan optisesti. Laboratoriossa on demonstroitu esimerkiksi usean 10 Gb/s bittivirran kanavointi 250 Gb/s bittivirtaan. OTDM:ssa pitää huolehtia siitä että dataa lähetetään ja vastaanotetaan oikeaan aikaan ja WDM:ssa, että eri kanavat ei sekoitu. Jos halutaan suuri siirtonopeus, voidaan nämä kaksi järjestelmää yhdistää; WDM lisää kapasiteettia lisäämällä kanavien määrää ja OTDM lisää jokaisen kanavan siirtonopeutta. OTDM/WDM-hybridiverkolla on demonstroitu 3 Tb/s siirtonopeuksia [Kaw+99].

Kuvaan 2-3 on koottu edellä pääpiirteittäin esitetty optisten verkkojen kehitys. Kuva herättää myös kysymyksen, mihin tekniikkaan tai mihin protokollaan perustuen tulevaisuuden optiset verkot kannattaa toteuttaa.



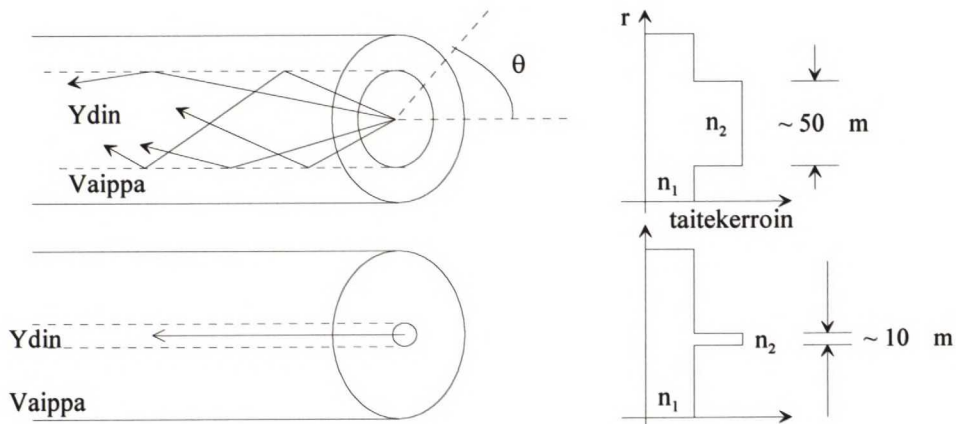
**Kuva 2-3.** Optisten verkkojen kehitys kaksipisteyhteydestä nopeisiin uudelleenjärjestyviin verkkoihin.

Kuvan 2-3 aikajanan loppuun on merkitty optinen purske- ja pakettikytkentä, joiden kehittämisessä on vielä paljon haasteita. Purskeytkennän perusajatus on yhdistää optinen signaalin reititys sekä sähköinen otsikko-informaatiokontrollointi. Optisen pakettikytkennän ongelmat liittyvät puskuroinnin, pakettien otsikoiden optisen käsittelyn ja signaalin täysin optisen regeneroinnin puuttumiseen. Esimerkiksi otsikoiden optiseen käsittelyyn tarvittavat elementit ovat kyllä jo olemassa, mutta integroimisaste on aivan liian alhainen. Kuvaan 2-3 merkitty optinen WDM ristikytkin on puolestaan komponentti, joka kytkee WDM-kanavat oikeisiin ulostuloihin aallonpituuksien perusteella.

### 3 Kuituoptisen tiedonsiirron fysikaalinen perusta

Tässä luvussa käsitellään optisten verkkojen toiminnan mahdollistavia sekä toisaalta toimintaa rajoittavia fysikaalisia ilmiöitä. Tyypillisesti kuituoptisessa tiedonsiirrossa signaalin lähettämiseen käytetään kapeakaistaisia lähettämiä kuten lasereita. Lähetettävä informaatio siirretään moduloituna kuidun välityksellä. Moduloinnilla tarkoitetaan lähetettävän valon jaksottamista bitteihin (ykkösiin ja nolliin). Jotta informaation tunnistaminen onnistuu, vastaanotinpään tulee tietää lähetinpään datamuoto. Yleisin modulointitapa on intensiteettimodulaatio, jossa lähettimen jatkuvaa ulostulosignaalia moduloidaan joko ulkoisen modulaattorin avulla tai lähettimen virran kautta. Intensiteettimoduloinnissa käytettyjä datamuotoja ovat mm. NRZ (*non-return-to-zero*) ja RZ (*return-to-zero*). NRZ-muodossa ykkösbitti on olemassa koko sovitun bittijakson ajan ja nolla-bitin aikana ei esiinny ollenkaan pulssia. RZ-muodossa ykkös-bitti esiintyy sen sijaan vain puolet koko bittijaksosta. Intensiteettimoduloinnin lisäksi modulointi on mahdollista toteuttaa vaihtoehtoisesti lähetinsignaalin taajuutta tai vaihetta moduloimalla. Intensiteettimodulaatio on kuitenkin vallitseva modulointitapa ja yleensä myös helpoiten toteutettavissa.

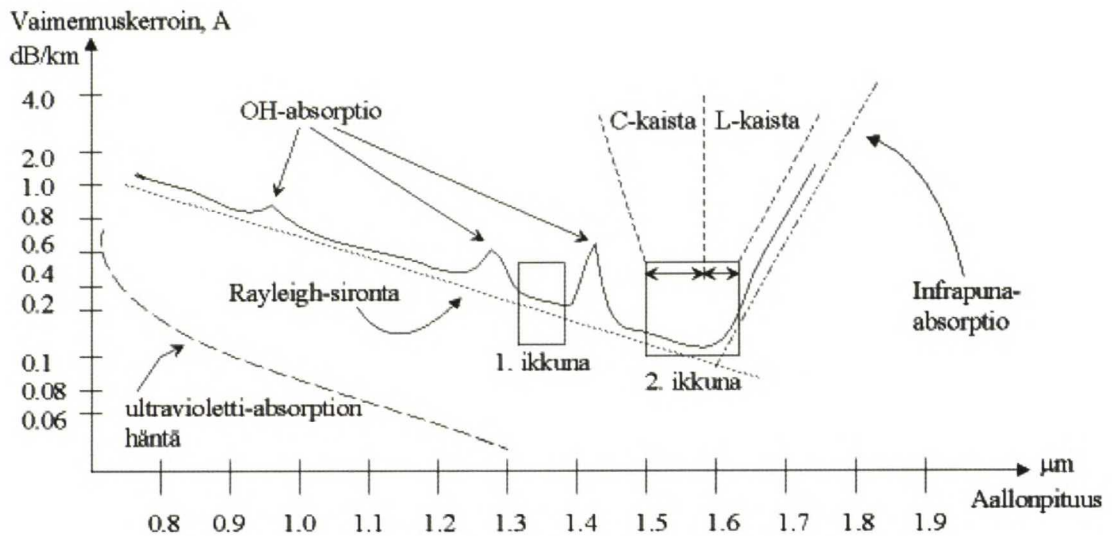
Optisen kuidun rungon muodostavat sylinterin muotoinen ydin ja pienemmän taitekertoimen kuori (*cladding*). Valon eteneminen kuidussa perustuu kokonaisheijastukseen, joka voidaan monimuotokuidun (ytimen paksuus noin 50  $\mu\text{m}$ ) kohdalta osoittaa sädeteorian avulla. Yksimuotokuitujen tapauksessa, jolloin ytimen paksuus on alle 10  $\mu\text{m}$ , joudutaan käyttämään aaltoteoriaa. Tällöin ratkaisut löytyvät Maxwellin yhtälöiden ja reunaehtojen avulla [Dia90].



**Kuva 3-1.** Säteen kulku yksi- ja monimuotokuidussa sekä askeltaitekerroinprofiilit.

Kuvassa 3-1 on esitetty yksi- ja monimuotokuidun rakenne sekä askelfunktiomainen taitekerroinprofiili. Taitekerroinprofiili voidaan valmistaa myös monimutkaisemmaksi halutun toiminnan aikaansaamiseksi. Esimerkiksi monimuotokuitujen taitekerroinprofiili valmistetaan usein siten, että se kasvaa asteittain siirryttäessä vaipasta ytimeen. Tällöin usean etenevän muodon muotodispersio (ks. luku 3.2) saadaan pienentymään. Kuvaan 3-1 on merkitty myös suurin mahdollinen kulma  $\theta$ , jolla valo vielä kytkeytyy kuituun. Tämän kulman sini-funktio määrittelee kuiduille tärkeän parametrin, ns. numeerisen aukon N.A. ( $N.A. = \sin \theta$ ).

Kuvaan 3-2 on piirretty standardiyksimuotokuidun vaimennus. Optisessa tietoliikenteessä käytetään infrapuna-alueen valoa (aallonpituus 0,8-1,7  $\mu\text{m}$ ) ja yleisimmät aallonpituudet ovat 1,31  $\mu\text{m}$  ja 1,55  $\mu\text{m}$ .



**Kuva 3-2.** Standardiyksimuotokuidun vaimennus. Kuvaan on merkitty myös yleisimmät optisessa tietoliikenteessä käytettävät aallonpituusikkunat.



Optiset yksimuotokuidut mahdollistavat laajakaistaisimman ja pisimmän siirtoyhteyden ilman pulssitoistimia. Nykyisellä tekniikalla perusrajoituksia kaistanleveydelle ja siirtoetäisyydelle ovat kuidussa etenevän muodon tehon vaimentuminen ja dispersio. Dispersio johtuu siitä, että kuidun taitekerroin ja etenevän muodon ryhmänopeus ovat aallonpituusriippuvaisia [Agr95]. Ideaalitilanteessa tietoliikenteessä käytetty signaali olisi moduloitu kanttiaalto. Dispersion seurauksena pulssit kuitenkin levenevät edetessään, jolloin vastaanotinpään on vaikeampi erottaa vierekkäisiä pulsseja. Lisäksi useat epälineaariset ilmiöt vaikuttavat signaalin etene- miseen. Seuraavaksi tarkastellaan yleisempiä siirtonopeutta ja -etäisyyttä rajoittavia ilmiöitä.

### 3.1 Vaimennus ja vahvistus

Standardiyksimuotokuidun vaimennus esitettiin kuvassa 3-2. Kuidun häviöt aiheutuvat pääsääntöisesti materiaaliabsorptiosta ja Rayleigh-sironnasta [Agr97]. Rayleigh-sironta on fundamentaalinen häviömekanismi, joka johtuu piidioksidin tiheyden mikroskooppisesta vaihtelusta. Tiheyden vaihtelu puolestaan syntyy siitä, kun sula piidioksidi jäähdytetään nopeasti valmistusvaiheessa. Tiheyden vaihtelun seurauksena kuidun taitekerroin vaihtelee satunnaisesti käytettävän valon aallonpituutta  $\lambda$  pienemmässä skaalassa. Rayleigh-sironnan vaikutusala on kääntäen verrannollinen aallonpituuden neljänteen potenssiin ja se asettaa minimivaimennuksen optisille kuiduille.

Materiaaliabsorptio koostuu puhtaan piidioksidin sekä siihen seostuneiden epäpuhtauksien aiheuttamista häviöistä. Puhdas piidioksidi ( $\text{SiO}_2$ ) aiheuttaa sähköisen resonanssin ultraviolettialueella ( $\lambda < 0,4 \mu\text{m}$ ) sekä värähtelyresonanssin infrapuna-alueelle ( $\lambda > 7 \mu\text{m}$ ). Piidioksidin amorfisesta luonteesta johtuen nämä absorptiot levittäytyvät myös tietoliikenteessä käytetyille aallonpituuksille. Piidioksidiin seostuneista epäpuhtauksista vaimennusta tietoliikenneaallonpituuksille aiheuttavat mm. siirtymämetallit kuten rauta ja kupari. Merkittävin vaimennusta aiheuttava tekijä ovat kuitenkin  $\text{OH}^-$ -ionit, jotka ovat peräisin kuituun valmistusvaiheessa diffusoituneesta vesihöyrystä. Niiden värähtelyresonanssit aiheuttavat vaimennuspiikit aallonpituuksille 1,39, 1,24 ja 0,95  $\mu\text{m}$ .  $\text{OH}^-$ -ionikonsentraatio 1 ppm voi aiheuttaa 50 dB/km vaimennuksen aallonpituudella 1,39  $\mu\text{m}$ . Nykyisellä valmistustekniikalla epäpuhtauksien määrä saadaan pysymään pienenä ja kuitu on hyvin tasalaatuista. Teoreettinen vaimennusminimi piidioksidikuidulle on 0,15 dB/km.

Kuidussa etenevä signaali siis vaimenee, koska osa tehosta absorptoituu kuituun ja osa siroaa. Lisäksi vaimennusta aiheuttavat verkoissa käytettävät komponentit (väliinkytkemisvaimennus sekä komponenttien epäidealaisuudet). Myös kuitumutkat lisäävät vaimennusta. Standardiyksimuotokuidun taivutussäteen tulee olla yli 7 cm. Jos taivutussäde on pienempi, kokonaisuajastusehto ei toteudu ja signaali ei ole enää rajoitettu etenemään kuidun ytimessä.



Vaimennus esitetään yleensä desibeli-yksiköissä. Suhteellisuus desibeleissä määritellään yhtälöllä

$$P[\text{dB}] = 10 \cdot \frac{P_1[\text{W}]}{P_2[\text{W}]}, \quad (3.1)$$

missä  $P_{1,2}[\text{W}]$  ovat tehot wateissa. Vaihtoehtoinen tehon yksikkö on dBm, joka kertoo kuinka monta desibeliä tehoa on nostettava tai laskettava, jotta saadaan yhden milliwatin teho. Yksikkö määritellään yhtälöllä

$$P[\text{dBm}] = 10 \cdot \log \frac{P[\text{mW}]}{1 \text{ mW}}. \quad (3.2)$$

Signaalien tehot on käytännöllistä esittää dBm-yksiköissä, koska silloin mm. vahvistus voidaan laskea suoraan ulostulo- ja sisäänmenotehojen erotuksena.

Optisen kuidun vaimennus esitetään yksikössä desibeliä per kilometri (dB/km). Tämä johtuu siitä, että vaimennus on eksponentiaalista kuidun pituuden funktiona. Jos  $A$  on kuidun vaimennus yksiköissä desibeliä per kilometri,  $P_{\text{tr}}$  lähetysteho sekä  $P(L)$  signaalin teho etäisyydellä  $L$  lähettimestä, saadaan vaimennus yhtälöstä

$$10 \cdot \log \frac{P_{\text{tr}}}{P(L)} = A \cdot L, \quad (3.3)$$

eli vaimennus desibeleissä on  $A$  kerrottuna matkalla  $L$  km. Vaimennuskertoimen  $A$  arvo on kuitukohtainen ja se riippuu mm. käytettävän signaalin aallonpituudesta sekä kuidun materiaalista.

Jos oletetaan muut siirtoa rajoittavat tekijät nolliksi, saadaan pisin mahdollinen pituus siirtoon käytettävälle kuidulle vaimennuskertoimen avulla. Asetetaan  $P(L) = P_{\text{rec}}$ , missä  $P_{\text{rec}}$  on vastaanottimen herkkyyys. Tällöin yhtälöstä 3.3 saadaan

$$L = \frac{10}{A} \log_{10} \frac{P_{\text{tr}}}{P_{\text{rec}}}. \quad (3.4)$$

Jos  $P_{\text{rec}}$  ja  $P_{\text{tr}}$  on esitetty yksiköissä dBm, saadaan kuidun pituuden maksimi yksinkertaisesti yhtälöstä

$$L = \frac{1}{A} [P_{\text{tr}}(\text{dBm}) - P_{\text{rec}}(\text{dBm})]. \quad (3.5)$$

Signaalin vaimeneminen voidaan kompensoida vahvistimien avulla (ks. luku 4.3.5). Vahvistimen vahvistus  $G(v_s)$  määritellään yleisesti ulostulo- ja sisäänmenotehojen suhteena

$$G(\nu_s) = 10 \cdot \log \frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{in}}} [\text{dB}] \quad (3.6)$$

Vahvistintyyppistä riippumatta vahvistin heikentää systeemin signaali-kohinasuhdetta (SNR, *signal-to-noise ratio*). SNR:n huononeminen voidaan määrittää vahvistimen kohinakertoimen  $F_n$  avulla [Des94]

$$F_n = \frac{\text{SNR}_{\text{in}}}{\text{SNR}_{\text{out}}}, \quad (3.7)$$

missä SNR on suhteessa generoituun sähkötehoon, kun optinen signaali muutetaan sähkövirraksi. SNR toimii siis mitattavan signaalin laadun mittana, mutta on huomattava, että se määritellään fotovirran tehotasojen suhteena. SNR ei siis ole optisten tehotasojen suhde vaan sähköisten tehojen suhde.

Vahvistimien kohinaominaisuuksia karakterisoitaessa usein käytetty suure on kohinaluku NF (*noise figure*). Kohinaluku on yhtälön 3.7 kohinakerroin esitettyä desibeliyksiköissä

$$\text{NF} = 10 \cdot \log(F_n) [\text{dB}]. \quad (3.8)$$

Yleisesti  $F_n$  muodostuu usean kohinalähteen summana. Vahvistimeen tulevan signaalin kohina on seurausta fotonien satunnaisesta saapumisesta detektoriin ja se on nimeltään raekohina. Itse detektori aiheuttaa termistä kohinaa. Lisäksi vahvistimen tuottama ASE-kohina sekoittuu ulostulossa itsensä ja signaalin kanssa aiheuttaen vastaanottimessa ASE-ASE- ja signaali-ASE-huojuntakohinaa.

Kohinalähteistä ASE-kohina on yleensä merkittävin. Vahvistimen (vahvistus  $G$ ) ASE-kohinan spektraalinen tiheys signaalitaajuudella  $\nu_s$  on [Agr97]

$$S_{\text{sp}} = n_{\text{sp}}(G(\nu_s) - 1)h\nu_s. \quad (3.9)$$

missä  $n_{\text{sp}}$  on populaatioinversiotekijä. Se riippuu nimensä mukaan vahvistimen atomitilojen populaatioista

$$n_{\text{sp}} = \frac{N_2}{N_2 - N_1}, \quad (3.10)$$

missä  $N_2$  on viritystilan ja  $N_1$  perustilan populaatio. Lähtien yhtälöstä 3.7 esimerkiksi EDFA:n kohinaluku voidaan esittää muodossa [Des94]

$$F_n \approx 2n_{\text{sp}}(G(\nu_s) - 1)/G(\nu_s). \quad (3.11)$$

Jos  $G(\nu_s) \gg 1$ , riippuu kohinaluku yhtälön 3.11 mukaan pelkästään vahvistimen populaatioinversiosta, johon vaikuttavat kuidun ominaisuudet sekä signaalin ja pumppulaserin teho. Vaikka vahvistin olisi ideaalinen ( $n_{\text{sp}} = 1$  ja  $G(\nu_s)$  suuri), nähdään yhtälöstä, että se huonontaa signaali-kohinasuhdetta tekijällä 2 eli 3 dB.

### 3.2 Dispersio

Toinen siirtonopeuden ja kaistanleveyden perusrajoitus on dispersio. Dispersio aiheuttaa pulssien levenemistä signaalin edetessä pitkin kuitua. Monimuotokuidussa etenee useita muotoja, joilla kaikilla on oma etenemiskerroin ja jotka kaikki siis etenevät eri ryhmänopeuksilla. Yksimuotokuidussa tästä aiheutuva monimuotodispersio ei ole enää ongelma, mutta silti dispersiota esiintyy. Yksimuotokuidun fundamentaalinen muodon ryhmänopeus on siis myös taajuusriippuva ja muodon eri spektrikomponentit kulkevat hieman eri nopeuksilla. Tämä johtuu kromaattisesta- eli ryhmänopeusdispersiosta [Agr97], joka koostuu materiaali- ja aaltojohdedispersioista. Materiaalidisersion aiheuttaa piidioksidin taajuusriippuva taitekerroin. Aaltojohdedispersio taas riippuu kuidun parametreista, kuten ytimen halkaisijasta sekä kuoren ja ytimen taitekerroineroista. Aaltojohdedispersio syy on se, että etenevä muoto ei ole rajoitettu kulkemaan pelkästään ytimessä vaan osa tehosta etenee myös kuorikerroksessa.

Ryhmänopeusdispersio rajoittaa optisten systeemien suorituskkyä. Sen vaikutusta bittinopeuteen voidaan estimoida yhtälöllä

$$BL|D|\Delta\lambda < 1, \quad (3.12)$$

missä B on bittinopeus, L siirtoetäisyys, D dispersioparametri ja  $\Delta\lambda$  spektrin leveys. Dispersioparametri D on ryhmänopeuden  $v_g$  käänteisluvun derivaatta

$$D = \frac{\partial}{\partial\lambda} \left( \frac{1}{v_g} \right) = -\frac{2\pi c}{\lambda^2} \beta_2, \quad (3.13)$$

missä  $\beta_2$  on nimeltään ryhmänopeusdispersioparametri. Standardiyksimuotokuidussa D on luokkaa 1 ps / (km-nm) 1300 nm läheisyydessä. D:n arvo riippuu sekä materiaali- että aaltojohdedispersiosta, jotka ovat aallonpituusriippuvia. Tämän seurauksena myös dispersioparametri vaihtelee huomattavasti aallonpituuden funktiona.

Dispersiota aiheuttaa myös kuidun kahtaistaitavuus. Kahtaistaitavuudesta aiheutuva polarisaatiomuotodispersio johtuu siitä, että kuidussa etenevän perusmuodon kaksi ortogonaalia polarisaatiota etenevät eri ryhmänopeuksilla [Ulr+79]. Ryhmänopeusero puolestaan aiheutuu kuidun epäsymmetrisestä geometriasta sekä kuidun jännitystiloista. Polarisaatiomuotodispersio on merkityksellistä vasta suurilla bittinopeuksilla (yli 10 Gb/s), sillä uusissa kuiduissa polarisaatiodispersio on pienempi kuin 0,5 ps / km<sup>1/2</sup>. Toisaalta käytössä olevissa kuiduissa polarisaatiomuotodispersio voi useinkin olla yli 10 ps / km<sup>1/2</sup>.



### 3.3 Viserrys

Signaalilaserin modulointi aiheuttaa laserin emittoivan valon taajuuden vaihtelua. Tästä ilmiöstä käytetään nimeä viserrys (*chirping*). Jos kuidussa etenevä signaali kokee dispersiota (eli jos valon nopeus muuttuu materiaalisissa aallonpituuden funktiona), niin viserrys kasvattaa pulssin levenemistä. Viserrys on erityisen voimakasta diodilasereissa (ks. luku 4.3.2.1), joita moduloidaan suoraan injektiovirran kautta [Koc+84]. Toisaalta ulkoisesti moduloiduissa tai elektro-absorptiolasereissa viserrys on huomattavasti vähäisempää. Laserdiodin viserrystä voidaan tutkia laserin jatkuvuusyhtälöiden avulla [Sve95].

Viserrys jaetaan kahteen komponenttiin, adiabaattiseen- ja transienttviserrukseen. Adiabaattinen viserrys johtuu siitä, että laserin taajuus seuraa ulostulotehon aaltomuotoa [Nie02]. Adiabaattinen viserrys aiheuttaa vaiheesiirron moduloidun signaalin nolla- ja ykköspulssien välille, joka johtaa pulssien siirtymiseen aikatasossa. Transienttviserrys puolestaan johtuu ulostulopulssin nopeista muutoksista ja se on voimakkainta silloin, kun signaali vaihtaa tilaansa (nollasta ykköseen tai toisin päin). Tietoliikenteen kannalta transienttviserrys on hyvin haitallista, sillä juuri se yhdessä dispersion kanssa johtaa pulssien levenemiseen.

Suoramoduloidun laserdiodin viserrys on riippuvainen mm. laserin viivanleveydestä, ulostulotehosta ja sammutussuhteesta. Sammutussuhde on ykkös- ja nolla-bittien tehotasojen suhde ( $r_{ex}=P_1/P_0$ ). Sammutussuhdetta voidaan säätää laserin bias-virran ja modulantivirran (modulointisyvyyden) avulla. Yleisesti sammutussuhteen kasvu aiheuttaa myös viserruksen kasvamista. Viserruksen minimoimiseksi suoramoduloinnin tapauksessa sammutussuhde tulee optimoida siten, että bias-virta on juuri yli laseroinnin kynnystason ja modulointisyvyys on mahdollisimman pieni. Suoramoduloitujen laserdiodien kohdalla pienin mahdollinen viserrys saavutetaan sammutussuhteella 7,8 – 9,4 dB [ITU G.957].

Matemaattisesti viserrys  $\delta\omega$ , eli taajuuden muutos, on suhteessa pulssin vaiheen derivaattaan

$$\delta\omega(t) = -\frac{\partial\phi}{\partial t} = \frac{C}{T_0^2} t, \quad (3.14)$$

missä  $\phi$  on kuituun kytketyn pulssin vaihe ja  $C$  viserrysparametri. Parametri  $T_0$  esittää pulssin leveyden puolikasta pisteessä, jossa pulssin intensiteetti on  $1/e$ -ertainen maksimi-intensiteettiin nähden.

Viserretyn pulssin Fourier-spektri on leveämpi kuin pulssin, jossa viserrystä ei esiinny. Tilanteessa, jossa  $C = 0$ , pulssin spektraalinen leveys toteuttaa yhtälön  $\Delta\omega_0 T_0 = 1$ . Tällöin

pulssin leveys on minimissään. Viserruksen vaikuttaessa pulssi levenee kertoimella  $(1 + C)^{1/2}$  [Agr97].

Tiedonsiirtoa rajoittava BL-tulo (bittinopeus kertaa kuidunpituus) löydetään määräämällä, että pulssin leveys ei kasva yli siedettävän rajan, ja piirtämällä tulo BL viserrysparametrin C funktiona. BL-tulo pienenee dramaattisesti, jos C on negatiivinen. Tämä johtuu siitä, että pulssin leveneminen kasvaa, kun tulo  $\beta_2 C$  on positiivinen. C on normaalisti negatiivinen suoramoduuloitujen puolijohdelaserien tapauksessa. Tyypillinen C:n arvo aallonpituudella 1,55  $\mu\text{m}$  on  $-6$ . Tällaisissa olosuhteissa  $BL < 100$  (Gb/s)-km eli esimerkiksi 50 km:sen kuidun dispersio rajoittaa bittinopeuden arvoon 2 Gb/s. Optisissa verkoissa syntyvää dispersiota voidaan kompensoida erillisillä komponenteilla tai dispersiomuokatuilla kuiduilla.

### 3.4 Epälineaariset optiset ilmiöt

Verkon suorituskyykyyn vaikuttavat myös epälineaariset optiset ilmiöt, kuten stimuloitu valon siroaminen, vaiheen itseis- ja ristimodulaatio sekä neliäaltosekoittuminen [Gor83]. Stimuloitua valon sirontaa aiheuttavat Raman- ja Brillouin-sironta. Sirontailmiöt johtuvat kuituun kytketyn valon fotonien vuorovaikutuksesta piidioksidilasin fononien eli hilavärähtelyjen kanssa. Stimuloitu Brillouin-sironta aiheuttaa kuituun taaksepäin siroavan valoallon. Siroavan valoallon taajuus on hieman pienempi kuin alkuperäisen, vastakkaiseen suuntaan etenevän signaalin. Tietyn kynnystehon yläpuolella suurin osa ylimääräisestä tehosta siirtyy sironneeseen valoalloon. Brillouin-sirontan kynnystehoa voidaan kasvattaa lähettimen viivanleveyttä leventämällä. Stimuloitu Raman-sironta esiintyy suuremmilla optisilla tehotasoilla kuin Brillouin-sironta. Raman-sironta saa kantoaallon tehohäviöiden lisäksi aikaan tehonsiirtymistä WDM-kanavien välille, joka puolestaan aiheuttaa ylikuulumista. Sekä stimuloidun Brillouin- että Raman-sirontan vaikutusalat ovat pieniä, joten niiden aiheuttamat häviöt ovat mitättömiä pienillä optisilla tehotasoilla.

Kuidun taitekertoimen intensiteettiriippuvuus aiheuttaa vaiheen itseis- ja ristimodulaatiota. [Ram+98]. Vaiheen itseismodulaatiossa epälineaarisen taitekertoimen seurauksena pulssin eri osat kulkevat eri nopeuksilla, joka aiheuttaa vaiheen siirtymistä, eli viserrys kasvaa. Vaiheen ristimodulaatiota voi esiintyä kun kahta tai useampaa eri taajuuksista kanavaa lähetetään kuidussa samanaikaisesti, jolloin kanavien välillä voi tapahtua ylikuulumista. Tietyn kanavan epälineaarinen vaihesiirtymä ei johdu siis pelkästään kanavan omasta tehosta vaan myös muiden kanavien tehoista. Käytännössä vaiheen ristimodulaatiota voidaan WDM-järjestelmissä pienentää kasvattamalla kanavien välisiä etäisyyksiä.

Intensiteettiriippuva taitekerroin synnyttää myös uusia taajuuskomponentteja ja tämä ilmiö on nimeltään neliäaltosekoittuminen. Neliäaltosekoittuminen ei riipu vaihemodulaatioiden tapaan



bittinopeudesta, mutta se riippuu vahvasti kanavien välistä ja kuidun dispersiosta. Neliaaltosekoittuminen aiheuttaa kanavan tehon siirtymistä toiseen kanavaan, joka aiheuttaa tehohäviön lisäksi kanavien välistä ylikuulumista.

### 3.5 Bittivirhesuhde ja herkkyysluonnonus

Bittivirhesuhde (BER, *bit error rate*) on tärkeä digitaalisia systeemejä karakterisoiva parametri. Yleisesti BER määritellään keskimääräisenä todennäköisyytenä, jolla vastaanotettu bitti tunnistetaan väärin. Tällöin BER ei ole riippuvainen käytettävästä siirtonopeudesta.

$$\text{BER} = p(1)P(0/1) + p(0)P(1/0). \quad (3.15)$$

Yhtälössä 3.15  $p(0)$  ja  $p(1)$  ovat ykkös- ja nollapulssien lähettämistodennäköisyydet.  $P(0/1)$  on ehdollinen todennäköisyys, että ykkösenä lähetetty bitti tunnistetaan nollaksi. Vastaavasti  $P(1/0)$  on ehdollinen todennäköisyys, että lähetetty nolla tunnistetaan ykköseksi.

BER ilmaistaan usein myös niin sanotun Q-tekijän avulla. Q-tekijä on määritelmän mukaan signaalin huipusta-huippuun-virta jaettuna tehollisella kohinavirralla

$$Q = \frac{I_1 - I_0}{\sigma_0 + \sigma_1}, \quad (3.16)$$

missä  $I_1$  on 1-pulssia ja  $I_0$  0-pulssia vastaava fotovirran keskiarvo sekä  $\sigma_1$  ja  $\sigma_2$  vastaavat keskihajonnat. Q-tekijän avulla BER voidaan esittää muodossa [Agr97]

$$\text{BER} = \frac{1}{2} \text{erfc}\left(\frac{Q}{\sqrt{2}}\right) \approx \frac{1}{Q\sqrt{2}} e^{-\frac{Q^2}{2}}. \quad (3.17)$$

Yhtälön 3.17 bittivirhesuhde on approksimatiivisesti Gaussinen ja se vastaa tilannetta, jossa vastaanottimen päätöksentekopiirin kynnystasot on asetettu ideaalisesti (ks. luku 4.3.3).

Optisten verkkojen mittauksissa usein käytetty referenssibittivirhesuhde on  $10^{-9}$ , ja se tarkoittaa, että yksi bitti miljardista tunnistetaan väärin. Bitti tunnistetaan väärin, jos esimerkiksi kohinan tai dispersion seurauksena nollaksi tarkoitetun bitin teho ylittää kynnystason ja se tulkitaan ykköseksi.

Bittivirhesuhteeseen vaikuttaa vastaanottimen herkkyys lisäksi verkon synkronointi ja synkronointi- eli ajoitusvirhe luonnollisesti kasvattaa bittivirhesuhdetta. Suurilla siirtonopeuksilla verkon ajoitus on suuri haaste, sillä bittiä ei käytännössä tunnisteta moduloidun pulssin huippujen perusteella vaan päätöksentekohetken määrää vastaanottimen kellonasettamispiiri.



Optisen verkon komponentit aiheuttavat myös signaaliin vääristymiä, jotka näkyvät vastaanottimen herkkyyshuononnuksina (*power penalty*). Herkkyyshuononnus kertoo kuinka paljon signaalin lähetysteho häiriötilassa on nostettava, jotta säilytetään sama bittivirhesuhde kuin häiriöttömässä tilanteessa. Tarvittava tehon lisäys vakio BER:n ylläpitämiseen (herkkyyshuononnus) voidaan esittää matemaattisesti yhtälöllä

$$p_p = 10 \cdot \log_{10} \left( \frac{\text{tarvittava teho häiriön vaikuttaessa}}{\text{tarvittava teho ilman häiriötä}} \right) [\text{dB}] \quad (3.18)$$

### 3.6 Tehobudjetti

Johtava ajatus verkkoa suunnitellessa on tehobudjetti. Sen laatimisen tarkoituksena on taata, että verkon loppupäässä sijaitsevaan vastaanottimeen saapuu tarpeeksi tehoa luotettavan suorituskyvyn ylläpitämiseen koko verkon eliniän ajan. Jos vastaanottimen vaatima minimiteho (herkkyys) on  $P_{\text{rec}}$  ja lähttimen keskimääräinen lähetysteho  $P_{\text{tr}}$ , voidaan tehobudjetti esittää muodossa

$$P_{\text{tr}} = P_{\text{rec}} + C_1 + M_s, \quad (3.19)$$

missä  $C_1$  on kanavan kokonaishäviöt ja  $M_s$  on systeemin marginaali. Marginaalin tarkoitus on jättää varaa mahdollisesti kasvaville tehohäviöille, jotka aiheutuvat mm. komponenttien vanhenemisesta.

### 3.7 Ylikuuluminen

WDM-järjestelmissä esiintyy sekä kanavan sisäistä (*intrachannel*) että kanavien välistä (*interchannel*) ylikuulumista (*crosstalk*). Kanavan sisäisessä ylikuulumisessa ylikuuluva signaali on tutkittavan kanavan aallonpituudella tai tutkittavan signaalin vastaanottimen sähköisen kaistanleveyden sisällä. Ylikuuluminen on kanavien välistä puolestaan silloin, kun kanavat ovat kauempana toisistaan kuin vastaanottimen sähköinen kaistanleveys. Aikaisemmin todettiin, että optisessa kuidussa etenevän signaalin vaiheen itseis- ja ristimodulaatio sekä neliaaltosekoittuminen aiheuttavat ylikuulumista. Nämä ylikuulumiset johtuvat kuidun epälinearisuuksista. Lisäksi ylikuulumista aiheuttavat WDM-verkon komponentit kuten multiplekserit, suodattimet, vahvistimet ja optiset kytkimet.

Verkoissa haitallinen ylikuuluva signaali ja datasignaali muodostavat pulssiparin, jota voidaan kuvata yhtälöllä

$$E(t) = b_s(t) \cdot \sqrt{2P_s} \cos(2\pi\nu_s t + \varphi_s(t)) + b_x(t) \cdot \sqrt{2P_x} \cos(2\pi\nu_x t + \varphi_x(t)), \quad (3.20)$$

missä  $P_{s,x}$  ovat datasihtaalin ja ylikuuluvan signaalin vastaanotetut tehot,  $v_{s,x}$  vastaavat taajuudet ja  $\varphi_{s,x}(t)$  vaiheet hetkellä  $t$ .  $b_s(t)$  ja  $b_x(t)$  ovat signaalien määräämät binaarifunktiot (0 tai 1). Koska teho on verrannollinen sähkökentän neliöön, voidaan vastaanotettu teho, olettamalla että  $P_x \ll P_s$ , kirjoittaa muodossa

$$P(t) = P_s \left[ b_s(t) + 2b_s(t)b_x(t) \sqrt{\frac{P_x}{P_s}} \cdot \cos(\varphi_s(t) - \varphi_x(t)) \right]. \quad (3.21)$$

Yhtälön 3.21 toinen termi kuvaa ylikuuluvan signaalin huojuntaa satunnaisessa vaiheessa datasihtaalin ympäristössä. Vastaanotettu teho on maksimissaan, kun signaaleilla on sama vaihe ( $\cos 0 = 1$ ) ja minimissään, kun vaiheet ovat vastakkaiset eli kun signaalien välillä on piin suuruinen vaihe-ero ( $\cos \pi = -1$ ).

### 3.7.1 Kanavien välinen ylikuuluminen

Kanavien välinen ylikuuluminen, joka jaetaan lineaariseen ja epälineaariseen ylikuulumiseen, on otettava aina huomioon WDM-verkkoa suunniteltaessa. Verkon suorituskyyky laskee dramaattisesti, kun kanavien välillä tapahtuu tehon siirtymistä. Optisissa verkoissa tehon siirtyminen on mahdollista johtuen epälinearisesta ympäristöstä. Vaihemodulaatioiden ja neliaaltosekoittumisen lisäksi kanavien välistä epälineaarista ylikuulumista aiheuttaa signaalifotonien stimuloitu sironta.

Optisten komponenttien aiheuttama kanavien välinen ylikuuluminen on lineaarista. Esimerkiksi optisen suodattimen päästökaista ei ole koskaan ideaalinen vaan se päästää lävitseen myös ei-toivottuja aallonpituuksia. Toinen esimerkki on optinen ristikytkin, jossa saattaa tapahtua signaalin muotokentän kytkeytymistä väärään porttiin.

Suodattimia käytetään WDM-verkoissa mm. kanavien reitittämiseen. Suodattimen lineaarista ylikuulumista voidaan tarkastella yhtälön 3.22 avulla. Jos suodatin on viritetty pudottamaan kanava  $m$ , niin detektorin vastaanottaman signaalin teho on

$$P = P_m + \sum_{n \neq m}^N T_{mn} P_n, \quad (3.22)$$

missä  $P_m$  on kanavan  $m$  teho ja  $T_{mn}$  on läpäisykerroin kanavalle  $n$ , kun suodatin on viritetty kanavalle  $m$ . Läpäisykerroimen arvo riippuu suodattimen siirto-ominaisuuksista. Ylikuuluminen on epäkoherenttia, sillä kanavan  $m$  teho riippuu yhtälön 3.22 mukaan muiden kanavien tehoista. Tehoa  $P$  vastaava detektorin synnyttämä fotovirta on nyt

$$I = R_m P_m + \sum_{n \neq m}^N T_{mn} P_n R_n = I_k + I_x, \quad (3.23)$$

missä  $R_m = \eta_m q / h \nu_m$  on detektorin responsiviteetti kanavalle  $m$  ( $\nu_m$  on kanavan taajuus ja  $\eta_m$  kvanttihyötysuhde). Ylikuuluvaa osaa virrasta  $I$  kuvaa termi  $I_x$ . Sen arvo riippuu signaalin bittirakenteesta ja se on suurimmillaan kun sekä tutkittava että ylikuuluva signaali vastaavat 1-bittiä. Tämä on myös vastaanoton kannalta pahin tilanne. Käytännössä tästä aiheutuva herkkyysluonnon estetään kasvattamalla kanavan  $m$  lähetysteho. Jos  $I_0 = I_x$  ( $I_k = 0$ , kun lähetetään 0-bittiä) ja  $I_1 = I_k + I_x$ , kanavan  $m$  herkkyysluonnon  $p_p$  desibeleissä on

$$p_p = 1 + \frac{I_x}{I_{ch}} = 10 \log_{10} \left( 1 + \frac{\sum_{n \neq m}^N T_{mn} P_n R_n}{R_m P_m} \right). \quad (3.24)$$

Yhtälöstä 3.24 nähdään, että jos kaikkien kanavien lähetystehot ovat samoja, on lineaarisen kanavien välisen ylikuulumisen indusoima herkkyysluonnon tehosta riippumatonta.

Kanavien välisen ylikuulumisen indusoima herkkyysluonnon esitetään usein myös ns. ylikuulumistason  $\epsilon$  avulla. Se määritellään ylikuuluvan signaalin ja tutkittavan signaalin tehojen suhteena

$$\epsilon = P_x / P_s, \quad (3.25)$$

jonka avulla  $p_p$  voidaan kirjoittaa muotoon [Ram+98]

$$p_p = -10 \log_{10} \left( 1 - 10^{\frac{\epsilon^{dB}}{10}} \right), \quad (3.26)$$

missä  $\epsilon^{dB} = 10 \log_{10} \epsilon$ , eli ylikuulumistaso desibeleissä. Jos ylikuuluvia kanavia on monta, saadaan efektiivinen ylikuulumistaso summaamalla yhteen kaikki ylikuulumistasot. Jos verkossa on esimerkiksi kaksi ylikuuluvaa kanavaa samalla ylikuulumistasolla, on niiden synnyttämä efektiivinen ylikuulumistaso 3 dB suurempi kuin yksittäisen kanavan ylikuulumistaso. Yleensä WDM-verkoissa ylikuuluu vain tutkittavan kanavan vierekkäiset kanavat ja muiden kanavien aiheuttama ylikuuluminen on merkityksetöntä.

### 3.7.2 Kanavan sisäinen ylikuuluminen

Suurin osa WDM-verkoissa esiintyvistä ylikuulumisista on kanavan sisäistä eli ylikuuluva signaali ja datasiignaali ovat samalla detektorin aallonpituuskaistalla. Verkoissa kanavan sisäisen ylikuulumisen haitallisuus korostuu, koska se on luonteeltaan kumulatiivista. Kanavan sisäistä ylikuulumista synnyttävät mm. signaalin multipleksointi ja demultipleksointi: kun kanavat erotellaan demultipleksorilla, voi tutkittavaan kanavaan jäädä pieni osa viereisen kanavan tehoa. Kun ne puolestaan kootaan uudelleen yhteen kuituun multipleksorilla, on tällä pienellä osalla tutkittavaa signaalia väärä vaihe. Kanavan sisäinen ylikuuluminen on voimakkainta silloin, kun datasiignaali ja ylikuuluvalla signaalilla on sama polarisaatio. Tällöin signaalien välillä



esiintyy vastaanotettaessa voimakasta interferenssiä. Optisia verkkoja suunniteltaessa tämä pitää ottaa huomioon, sillä valon polarisaatio muuttuu ajan funktiona, johtuen mm. polarisaatiomuotodispersiosta ja lämpötilan muutoksista. Lämpötilan ja viserröksen seurauksena muuttuu myös signaalien vaihe-ero, joka aiheuttaa vastaanotettaessa lisää herkkyysluononnusta.

Kanavan sisäinen ylikuuluminen jaetaan ylikuuluvan signaalin ja datasiinaalin matkaeron perusteella vielä koherenttiin ja epäkoherenttiin ylikuulumiseen. Koherentissa tapauksessa signaalien matkaero on paljon suurempi, ja epäkoherentissa pienempi, kuin laserin koherenssipituus. Jos WDM-verkossa käytetään DFB-lähetinlasereita, koherentti kanavan sisäinen ylikuuluminen on ongelma lähinnä WDM-verkon solmupisteissä. Tämä johtuu siitä, että DFB-lasereiden koherenssipituus on suhteellisen lyhyt (~10 m). Koherentin ylikuulumisen tarkka määrittäminen vaatii signaalikohinan tilastollista käsittelyä [Gus+97].

Verkoissa esiintyvän epäkoherentin ylikuulumisen tarkastasteluun riittää puolestaan yhtälö 3.20. Tästä yhtälöstä voidaan ratkaista ylikuuluvan signaalin ja datasiinaalin interferenssin aiheuttamat herkkyysluononnukset. Riippuen vastaanottimen päätöksentekolohkon kynnys-tasosta, voidaan herkkyysluononnukset esittää muodossa [Gol+94]

$$\text{DC - kytketty vastaanotin, } p_p = -10 \log_{10} \left( 1 - 4 \cdot 10^{\frac{\epsilon'}{20}} \right) \quad (3.27)$$

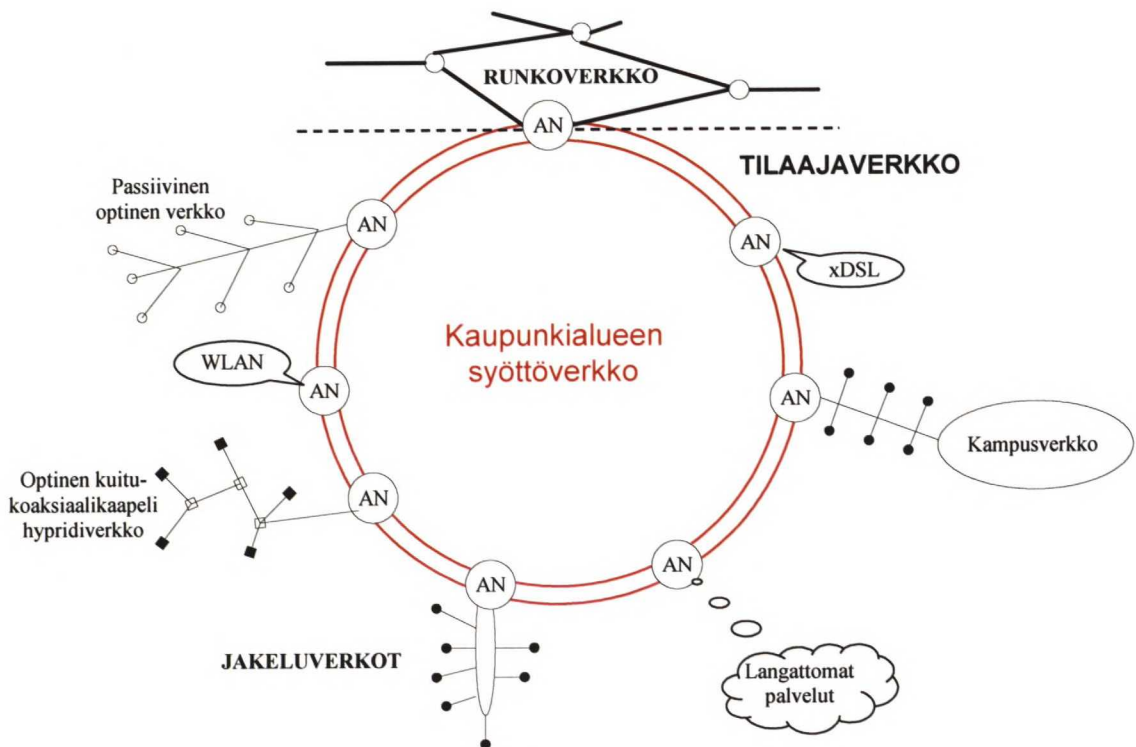
$$\text{AC - kytketty vastaanotin (paras tilanne), } p_p = -10 \log_{10} \left( 1 - 2 \cdot 10^{\frac{\epsilon'}{20}} \right) \quad (3.28)$$

$$\text{AC - kytketty vastaanotin (huonoin tilanne), } p_p = -10 \log_{10} \left( 1 - 6 \cdot 10^{\frac{\epsilon'}{20}} \right). \quad (3.29)$$

Yhtälöissä 3.27-3.29 esiintyvät AC- tai DC-kytkennät liittyvät juuri vastaanottimen päätöksentekokynnyksen asettamiseen. DC-kytkennässä kynnystaso asetetaan kohinan perusteella laskettavaan optimiarvoon ja AC-kytkennässä kynnys asettuu 0- ja 1-pulssien puoliväliin. Koska DC-kytkentä on hankalemmiin toteutettavissa kuin AC-kytkentä, ovat vastaanottimet yleensä AC-kytkettyjä.

## 4 Optiset kaupunkialueen WDM-verkot

Tietoliikenneverkko jaetaan kolmeen erilliseen kokonaisuuteen: suuralueen verkkoon (WAN), kaupunkialueen verkkoon (MAN) ja lähialueen verkkoon (LAN). Suuralueen verkko eli runkoverkko yhdistää tyypillisesti kaupunkeja, valtioita tai maanosia, jolloin verkon solmuväli voi olla hyvin suuri. Esimerkiksi Euroopan ja Amerikan yhdistävän valtamerenalaisen verkon solmuväli on useita tuhansia kilometrejä ja loppukäyttäjää molemmissa päissä kymmeniä miljoonia. Kaupunkialueen verkoissa solmuvälit ovat muutamasta kilometristä muutamaa kymmeneen kilometriin ja ne sisältävät normaalisti joitain kymmeniä solmuja. Lähialueen verkko yhdistää MAN:n ja loppukäyttäjän ja siinä siirtoetäisyydet ovat enää kymmenistä metreistä muutamaa kilometriin.



**Kuva 4-1.** Tietoliikenneverkon yleinen rakenne.

Kuvan 4-1 jakeluverkot ovat tyypillisesti joko väyliä tai paikallisia tilaajaverkkorenkaita, jotka yhdistävät kaupunkialueen syöttöverkon liityntäpisteen (AN, *access node*) ja käyttäjän toimitilan. Toimitilassa data liikkuu pitkin sisäistä verkkoa ja toimitilan ulkopuoliseen liikenteseen käytetään julkista verkkoa. Paikallinen tilaajaverkko sisältää kaikki elementit syöttöverkon liityntäpisteen ja käyttäjän loppuaseman välillä. Lähialueen tilaajaverkon kaksi tärkeintä komponenttia ovat käyttäjän omistama LAN (rakennuksissa, kampusalueella, jne.) sekä liityntälinkki kaupunkialueen syöttöverkkoon. Lähiverkkojen dominoiva teknologia on tällä

#### LUKU 4. Optiset kaupunkialueen WDM-verkot

hetkellä Ethernet. Kaupunkialueen verkon liityntälinkki on puolestaan verkostoinnin kannalta usein ongelmallinen ”viimeinen maili” käyttäjän toimitilan ja MAN:n välillä.

Tässä luvussa käsitellään juuri tiedonsiirtoverkon kaupunkiosan ominaisuuksia. MAN on perinteisesti ollut hinta/suorituskyky pullonkaulana suuralueen verkon ja lähiverkon välillä. Pienikapasiteettiset kaupunkialueen verkot eivät ole pystyneet hyödyntämään runkoverkon kaistaa tehokkaasti. Tämä on yksi syy, miksi suurikapasiteettisillä WDM-verkoilla on kysyntää myös kaupunkialueella. Taulukkoon 2 on koottu optiselta kaupunkialueen verkolta toivottuja vaatimuksia.

**Taulukko 2.** Optisen kaupunkiverkon toivelista, mukailleen [Ste+99].

<b>Liitettävyys</b>	-Verkon tulee tukea suurta määrää loppuasemia ja järjestelmiä -Usean samanaikaisen yhteyden tehokas tukeminen
<b>Suorituskyky</b>	-Suuri läpivientikapasiteetti -Korkea käyttäjän siirtonopeus -Pieni läpivienti viive -Matala virhesuhde / korkea signaali-kohinasuhde -Matala solmupisteiden prosessointikuorma -Sopeutuvuus muuttuvaan ja epäsymmetriseen kuormaan -Nopea ja tehokas virheiden tunnistaminen ja niistä toipuminen (suojaus)
<b>Rakenteelliset ominaisuudet</b>	-Skaalattavuus -Modulaarisuus -Virheiden sietokyky -Läpinäkyvyys
<b>Teknologia/kustannukset</b>	-Kustannustehokkaat ja rajoitetun monimutkaiset solmurakenteet -Rajoitettu määrä ja pituus kuitua sekä optisen spektrin tehokas käyttö

Taulukon 2 toiveet voidaan toteuttaa WDM-hybridiverkolla, jossa fyysinen taso on optinen, mutta fyysisen tason yläpuolella olevat loogiset verkot toteutetaan sähköisesti. Loogiset verkot toteutetaan ylempien sähköisten protokollien avulla ja jokainen verkko on erikoistunut tarjoamaan jonkin tietyn palvelun käyttäjäryhmälle. Näitä ovat mm. internet-liitanta, tilausvideonjakelu, perinteiset puhelinpalvelut tai vaikka tyhjä optinen kanava tulevia tarpeita varten.

Jos WDM-kanavien määrä on enemmän kuin kaksi puhutaan yleisesti tiheästä tai hienojakoisesta aallonpituuskanavoinnista (DWDM, *dense WDM*). Tässä työssä molempia lyhenteitä WDM ja DWDM käytetään tarkoittaessa järjestelmiä, joissa käytetään useita kanavia. Koska DWDM on vain fyysisen optisen tason arkkitehtuuri, on se riippumaton käytettävästä protokollasta ja bittinopeudesta. DWDM-pohjainen verkko voi siirtää dataa IP-, ATM-, SONET/SDH-, tai Ethernet-muodoissa sekä bittinopeus voi vaihdella esimerkiksi 100 Mb/s ja 40 Gb/s välillä. Kaupunkiverkoissa yleisin liikennemuoto on IP-liikenne, jonka



siirtäminen on muiden perinteisten datamuotojen tapaan suhteellisen vaivatonta. Liikennöinnin suurimman haastan muodostavat uudet multimedia-internetpalvelut.

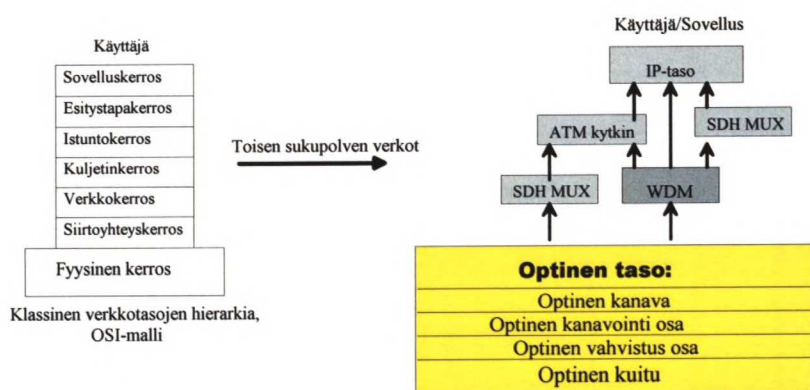
Kaupunkialueen syöttöverkko on jo hyvin lähellä loppukäyttäjää, joten se on herkkä kustannuksille. Jokaisen MAN:n solmu on yhdistetty lähiverkolla loppukäyttäjään ja solmun muuttuvat kustannukset tulevat loppukäyttäjän eli tilaajan maksettavaksi. Käytännössä tällainen tilanne nostaa tietysti kaikkien tilaajien kustannuksia tasapuolisesti. Tämän johdosta kaupunkialueen verkkoja suunniteltaessa on tehobudjetin lisäksi kiinnitettävä erityistä huomiota kustannuksiin, jotka koostuvat sekä verkon rakentamisesta että ylläpidosta.

Kaupunkialueen verkkojen talousanalyysiä on käsitelty mm. viitteessä [Joh+98]. Tällä hetkellä yleisesti voimassa oleva käsitys on, että kaupunkialueen verkko on kustannustenkin kannalta mahdollista toteuttaa täysin optisena WDM-teknologiaa hyväksikäyttäen. WDM:n avulla operaattorit voivat kasvattaa olemassaolevan optisen kuituverkoston kapasiteettia ilman uusia kuituasennuksia. Tämä on merkittävä kustannusten säästö, sillä kuidun maahan kaivaminen on hyvin kallista (luokkaa \$60000/maili [Ste+99]). Lisäksi WDM-teknologia vähentää mahdollisesti tarvittavien toistimien määrää. Yksi tärkeä näkökohta on myös verkon uudelleenjärjestely (laajentaminen/skaalattavuus), joka on huomattavasti vaivattomampaa WDM-verkolle kuin perinteiselle yksikanavaisella verkolla. Uuden datan kytkeminen vaivatta verkkoon katsotaan usein jopa siirtämistä tärkeämmäksi toiminnoksi [Sal+99].

## 4.1 Verkkoarkkitehtuurit

Kuvassa 4-2 on esitetty klassinen verkon hierarkia [Ram98]. Tämä ns. OSI-malli on ISO:n (*International Standards Organization*) luoma verkon rakenteeseen liittyvä viitekehys. Mallin tarkoitus on luoda puitteet avoimien järjestelmien välistä liikennöintiä varten tarvittaville standardeille. Avoimuudella tarkoitetaan sitä, että eri palveluihin ja verkkoihin liitetyt eri valmistajien laitteet voisivat kommunikoida ongelmitta keskenään. OSI-malli koostuu seitsemästä päällekkäisestä kerroksesta, joiden tehtävät on määritelty, mutta toteutustapa on jätetty avoimeksi. Idea on, että muutokset jossakin kerroksessa eivät aiheuta muutoksia muihin kerroksiin.

Kuvassa 4-2 on esitetty myös toisen sukupolven verkon sekä sen optisen tason rakenne. Ensimmäisen sukupolven optisissa verkoissa fyysinen taso on periaatteessa optinen kaksipistekuituyhteys. Toisen sukupolven optisissa verkoissa fyysinen taso sisältää optisen tason, joka muodostaa siirrettävälle datalle polun ylemmille tasoille. Optinen taso koostuu kuvan mukaan kolmesta osasta: optisesta kanavasta, optisesta kanavointiosasta sekä optisesta vahvistusosasta.



Kuva 4-2. OSI-malli sekä optisen toisen sukupolven verkon hierarkia

#### 4.1.1 Kaksipisteyhteys (point-to-point)

Mahdollisia kaksipisteyhteys topologioita ovat rengas, tähti sekä verkko. Kaupunkialueella hyvin palveleva topologia on rengas [Joh+98]. Rengasrakenne mahdollistaa luotettavan verkonhallinnan, varsinkin jos rengas muodostetaan vähintään kahdesta rinnakkaisesta kuidusta. Usein kaupunkialueella jo olemassaoleva verkko muodostaakin fyysisesti rengasrakenteen. Kaksi kuitua yhdessä optisten ristikytkimien kanssa synnyttää hyvin suojatun rakenteen, jolloin kuidun katketessa data on suhteellisen vaivatonta reitittää kulkemaan pitkin ehjää polkua.

#### 4.1.2 Lähetysverkko (broadcast-and-select)

Lähetysverkossa jokainen kanava lähetetään pitkin optista väylää (*bus*) jokaiselle vastaanottajalle. Vastaanottaja puolestaan valitsee kanavista sen, jonka hän haluaa. Ratkaisun heikkouksia ovat kanavien jakamisesta syntyvät suuret tehohäviöt ja mahdolliset tietoturva-ongelmat. Esimerkki lähetysverkosta on analoginen kaapeli-TV (CATV), jossa lähetetään apukantoaaltojen avulla useita videokanavia. Myös CATV voi hyötyä WDM-teknologiasta. Väylän lisäksi lähetysverkko voi olla myös tähtiverkko. Tällöin jokainen itsenäinen kanava yhdistetään passiivisen tähtikyttimeen, joka jakaa signaalit jokaiselle vastaanottajalle yhtäläisesti.

#### 4.1.3 WDM-moniliittymäverkot (multiple-access)

Nämä verkot tarjoavat jatkuvan kaksisuuntaisen yhteyden jokaiselle kanavalle. Jokainen käyttäjä voi siis vastaanottamisen lisäksi lähettää dataa jokaiselle verkon käyttäjälle. Esimerkki perinteisestä moniliittymäverkosta on puhelinverkko. WDM-tekniikan tuo tällaisiin verkkoihin uudenlaisen lähestymistavan, sillä mm. signaalin kytkemiseen ja reitittämiseen voidaan käyttää signaalin omaa aallonpituutta. Tällainen verkko voisi olla esimerkiksi aallonpituusreititetty rengasverkko (*multi/single-hop ring network*), jossa käytetään säädettäviä suodattamia ja



lähettämiä sekä aallonpituusmuuntimia. Yksinkertaisempi esimerkki on passiivinen optinen verkko (PON, *passive optical network*), jossa kaikki kanavat lähetetään passiivisten multipleksereiden avulla kaikille käyttäjille. Tilaajapäässä kanavat erotellaan passiivisella demultipleksierillä, joten aktiivisia kytkimiä ei tarvita. Jos tilaajien määrä on  $N$ , niin PON:ssa kanavia tarvitaan  $2N$  kappaletta ( $N$  kappaletta molempiin suuntiin kulkevalle liikenteelle).

## 4.2 Verkon hallinta ja suojaus

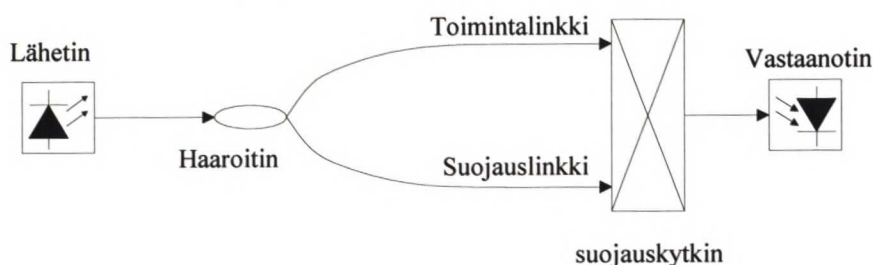
Verkon hallinta koostuu kolmesta osa-alueesta [Agr97]: rakenteen hallinnasta, toiminnan tarkkailusta ja vikojen hallinnasta. Rakenteen hallinnan tehtävänä on taata se, että verkko pysyy hallittavissa jos sitä laajennetaan tai päivitetään. Toiminnan tarkkailun tehtävänä on mm. seurata lähettimien, vastaanottimien ja siirtolinkin bittivirhettä. Vikojen hallinta eli suojaus puolestaan takaa sen, että verkko toimii moitteettomasti myös virheen sattuessa. DWDM-tekniikan ja siirtonepeuden kasvun johdosta suojauksen merkitys on edelleen lisääntynyt, koska linkin katketessa tai solmupisteen vioituessa voi hukkaan joutua suuri määrä tietoa. Vikojen analysointi julkisessa puhelinverkossa ajalla 1992-1994 on osoittanut, että ihmisten virheet, luonnonilmiöt sekä ylikuorma ovat suurimmat vikojen lähteet [KUH97]. Tutkimuksen ajanjakson virheistä noin puolet aiheutui kuidun katkeamisista tai komponenttien vioista. Maahan kaivettujen kuitujen vika-alttius johtuu siitä, että normaalisti ne on kaivettu samaan koloon muiden hyödyllisten siirtoteiden kanssa (vesijohto, kaasuputki, televisiokaapeli, kaukolämpö, jne.).

Vaikka vikoja ei voida välttää, nopea havaitseminen, vikojen tunnistus, ja verkon palauttaminen ennalleen tekevät verkosta luotettavan, ja viime kädessä se kasvattaa tilaajien luottamusta. Jotta tämä olisi mahdollista, verkon rakenteen tulee sisältää ”eloontajamismekanismi”. Eloontajamismisen lisäksi verkon kapasiteetin tulee palautua vian jälkeen normaalille tasolle mahdollisimman nopeasti. Palautumisnopeus ei ole pelkästään taloudellinen kysymys vaan myös ehtona elintärkeille palveluille, joita verkko tarjoaa. Kun aikaisemmin tiedonsiirtoverkon sähkökatkos tarkoitti, että käyttäjän puhelu katkesi ja hänen täytyi soittaa myöhemmin uudelleen, nykyään sähkökatkos voi vaikuttaa pankkeihin, pörssiin, lentokenttiin tai julkiseen sairaanhoitoon.

Suurin osa suojauksen tutkimuksesta on keskittynyt kaksipiste systeemeihin, itsestään palautuviin renkaiisiin, sekä keskitettyyn suojaukseen, jossa käytetään sähköisiä ristikytkimiä. Optisella (1+1)-suojausarkkitehtuurilla palvelut suojataan vain kuidun katkeamisen varalta. (1+1)-suojauksessa käytetään optisia jakajia optisen signaalin lähettämiseen kahdessa kuidussa. Kaksi kuitua, suojauslinkki ja toimintalinkki, ovat kaksi fyysisesti erillään olevaa polkua lähtö- ja pääteterminaalien välillä. Kuidun katketessa optinen ristikytkin vastaanotinpuolella kytkeytyy kuuntelemaan suojauskuitua [Wu92]. Kun vika on korjattu, tulee kytkimen kääntyä takaisin alkuperäiseen asentoon. Koska verkoissa ei ole yleensä kaksinkertaista elektroniikkaa, voidaan



kuidun katkeaminen korjata, mutta lähettimien tai vastaanottimien rikkoutuminen johtaa datan katoamiseen. Kuvassa 4-3 on esitetty (1+1)-suojauksen periaate.



**Kuva 4-3.** Optisen tason (1+1)-suojaus.

Optisen tason (1+1)-suojauksen heikkous on se, että vastaanotin ei tiedä mitään suojauslinkin tilasta normaalitoiminnassa. Sähköisessä SONET-(1+1)-suojauksessa molempien linkkien ulostulot vastaanotetaan ja näistä signaaleista valitaan parempi.

Linkin katkeamisen lisäksi verkon tulee toimia myös laitteiden viottuessa. Tällöin tarvitaan uusia suojausarkkitehtuureja, kuten (1:1)- tai (1:N)-suojausta. (1:1)-suojaus vastaa (1+1)-suojausta, jos vika on kuidun katkeaminen. Palvelut (datasignaalit) eivät ole kuitenkaan reititetty kulkemaan koko ajan pitkin molempia kuituja. Kuvan 4-3 lähetinpään haaroitin on (1:1)-suojauksessa korvattu kytkimellä, joka kytkee signaalin tilanteesta riippuen oikeaan kuituun. (1:1)-suojauksessa suojauslinkki ei siis toimi kommunikointipolkuna muulloin kuin vian sattuessa.

Kun vika sattuu (1:1)-suojatussa verkossa, vastaanotin lähettää viestin lähetinpäähän pitkin suojauskuitua, tietämättä onko myös lähetinpää siirtynyt kuuntelemaan suojauslinkkiä. Jos lähetinpää on kytkeytynyt suojauslinkkiin, niin palvelu on pelastettu ja verkon toiminta on palautunut alkutilaan. Muulloin palvelu on kadotettu. Kuunteluongelma voidaan poistaa käyttämällä erillisiä optisia kanavia suojauskytkimien tukemiseen (signalointi). Nämä kanavat voidaan sijoittaa esimerkiksi käytettävän siirtokaistan (joka normaalisti on C-kaista) ulkopuolella. Yksi hyvä vaihtoehto on käyttää 1.3  $\mu\text{m}$  kaistaa, jolle on saatavana edullisia lähtimiä.

(1:N) suojaus vastaa (1:1) suojausta, mutta siinä N toimintalinkkiä jakaa saman yksittäisen suojauslinkin. Jos useita kuituja katkeaa samanaikaisesti, vai yhden kuidun liikenne voidaan pelastaa. Kuiduissa kulkeville datoilta voidaan määrittää prioriteetti, jolloin luonnollisesti korkeimman prioriteetin datasiignaali pelastetaan.

Kaikki edellä käsitellyt arkkitehtuurit ovat päästä-päähän linkin suojausta. Myös rengasverkon suojausta voidaan ajatella päästä-päähän suojauksena, jos tarkastellaan vain kahta vierekkäistä

solmua. Rengasrakenne tuo mukaan kuitenkin paljon lisää mahdollisuuksia suojauksen toteuttamiseen. Seuraavaksi esitellään kaksi kaksikuituisen renkaan suojaustapaa.

Yksisuuntaisessa WDM reittiprotektoidussa renkaassa (UPPR, *unidirectional path-protected ring*) verkon solmupisteet on yhdistetty kahdella kuidulla, joissa kulkee liikenne vastakkaisiin suuntiin [Ste+99]. Toinen kuiduista on suojauslinkki ja toinen toimintalinkki. Kaikki datakanavat kulkevat toimintalinkissä yhteen suuntaan ja suojausliikenne kulkee toisessa kuidussa vastakkaiseen suuntaan. Signaali lähetetään siis kulkemaan kahtena kopiona (yksi kumpaankin linkkiin) esimerkiksi optisen haaroittimen avulla erisuuntiin pitkin rengasta. Vastaanotin päässä kuunnellaan oletusarvoisesti lyhintä mahdollista reittiä (toimintalinkki), mutta vian sattuessa kytketään suojauslinkki aktiiviseksi. Vastakkaiseen suuntaan kulkeva signaali takaa täten verkon selviytymisen toimintalinkin katketessa.

Toinen vaihtoehto kaksikuituisen renkaan suojaukseen on varata molempien kuitujen kapasiteetista puolet suojaukseen. Vierekkäiset solmut on tässäkin tapauksessa yhdistetty kahdella kuidulla. Molemmat kuidut ovat kuitenkin nyt toimintalinkkejä ja puolet kuitujen kaistasta on varattu suojaukselle. Tämä suojausmalli vaatii aallonpituuksien (kanavien) valitsemista, joka tuottaa optisessa muodossa hieman ongelmia. Ongelma voidaan kuitenkin ratkaista esimerkiksi käyttämällä kanavien erotteluun optisia vuoroerottimia (ks. luku 4.3.7), joka jakaa tulevat kanavat kahteen ulostulokuituun: parilliset kanavat toiseen ja parittomat toiseen. Verkon suojaukseen palataan luvussa 6.

### 4.3 WDM-komponentteja

Tässä luvussa esitellään tärkeimpiä optisissa verkoissa käytettäviä komponentteja. WDM-teknologian käyttöönoton seurauksena optisiin verkkoihin on tullut paljon uusia komponentteja. Tällainen on esimerkiksi multiplekseri, jolla eri kanavat yhdistetään yhteen kuituun. Kanavien erottelu taas tapahtuu demultiplekserillä. Optinen tähtikytkin puolestaan sekoittaa useita sisäänmenokanavia useaan eri ulostuloon. Myös komponenttien säädettävyyks on WDM-teknologian johdosta noussut merkittävään rooliin; säädettävillä suodattimilla voidaan esimerkiksi haluttu kanava poistaa halutussa kohtaa verkkoa ja yhdellä säädettävällä laserilla voidaan hoitaa usean kanavan lähettäminen. Lisäksi mm. aallonpituusreitittimet ja aallonpituusdensiirtokomponentit ovat WDM-teknologian mukanaan tuomia uutuuksia. Kaikkien näiden komponenttien lisäksi WDM-verkko sisältää tietysti kaikki perinteiset rakenneosat, kuten kuidun ja ristikytkimet.

Toisaalta WDM-teknologia asettaa komponenttitekniologioille kovia vaatimuksia, sillä nykyisin käytetyt kanavavälit ovat tyypillisesti vain 50 – 200 GHz:ä. Aallonpituuksissa tämä vastaa 1550 nm:n alueella 0,4 – 1,6 nm:n kanavaväliä. Käytännön järjestelmissä kanaville pitää lisäksi jättää

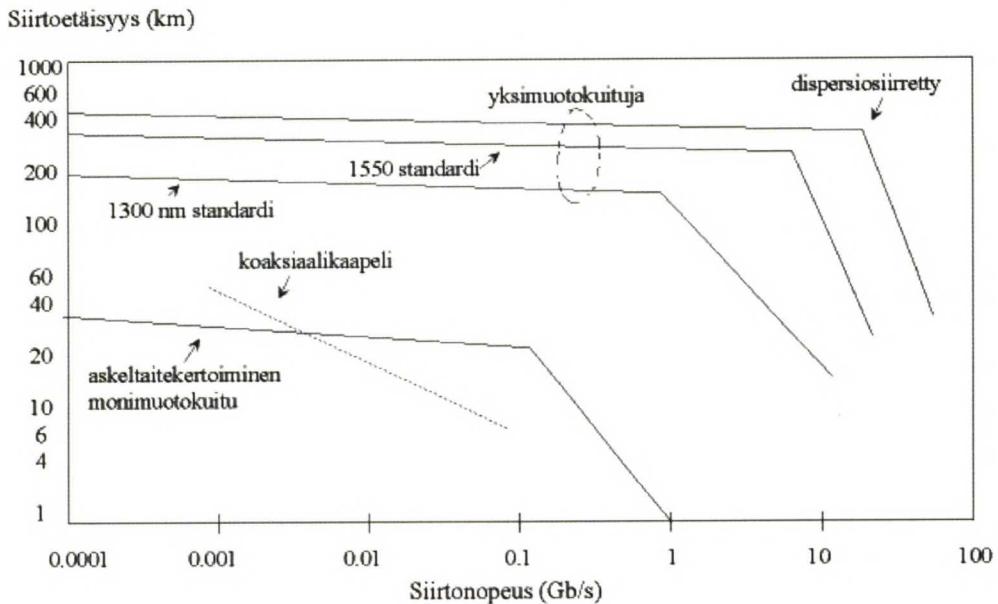


suojakaistaa, joka sallii esimerkiksi lähettimien aallonpituuden pienen epätarkkuuden ja ajelehtimisen kanavan keskiaallonpituuden ympäristössä. Lisäksi suojakaista mahdollistaa WDM-signaalien vastaanottamisen kohtuullisen yksinkertaisilla vastaanottimilla.

### 4.3.1 Optinen kuitu

Kuituoptisessa tietoliikenteessä datan siirtoon voidaan käyttää yksi- tai monimuotokuitua. Nykyisin yksimuotokuidulla on mahdollista päästä noin 0,2 dB/km vaimennukseen aallonpituudella 1550 nm (ks. kuva 3-2). Optisen kuidun kapasiteetti määritellään usein tulona BL, jossa B on bittinopeus ja L maksimisiirtoetäisyys. Tämä tulo on noin kymmenkertaistunut neljän vuoden välein alkaen vuodesta 1974.

Optisen kuidun valtava tiedonsiirtokyky on esitetty kuvassa 4-4. Optisessa tietoliikenteessä yksimuotokuitu on nykyään johtavassa asemassa. Monimuotokuituja käytetään vain joissain erikoissovelluksissa tai lähiverkoissa, joissa voidaan käyttää lähtiminä halpoja 1,3 ja 0,8  $\mu\text{m}$  alueen laajakaistaisia ledejä. Pidemmällä siirtoetäisyyksillä yksimuotokuitu on kuitenkin ylivoimainen ja myös tässä työssä kaupunkialueen koeverkon reititys on toteutettu yksimuotokuitua käyttäen. Yksimuotokuidun ylivoimasta johtuen sitä on tutkittu ja kehitetty kovasti, jonka seurauksena se on tänä päivänä tavallisesti monimuotokuitua halvempaa.



**Kuva 4-4.** Siirtoetäisyys siirtonopeuden funktiona. Yksimuotokuidulla on mahdollista toteuttaa yli 300 km yhteys ilman signaalitoistimia usean Gb/s siirtonopeudella.



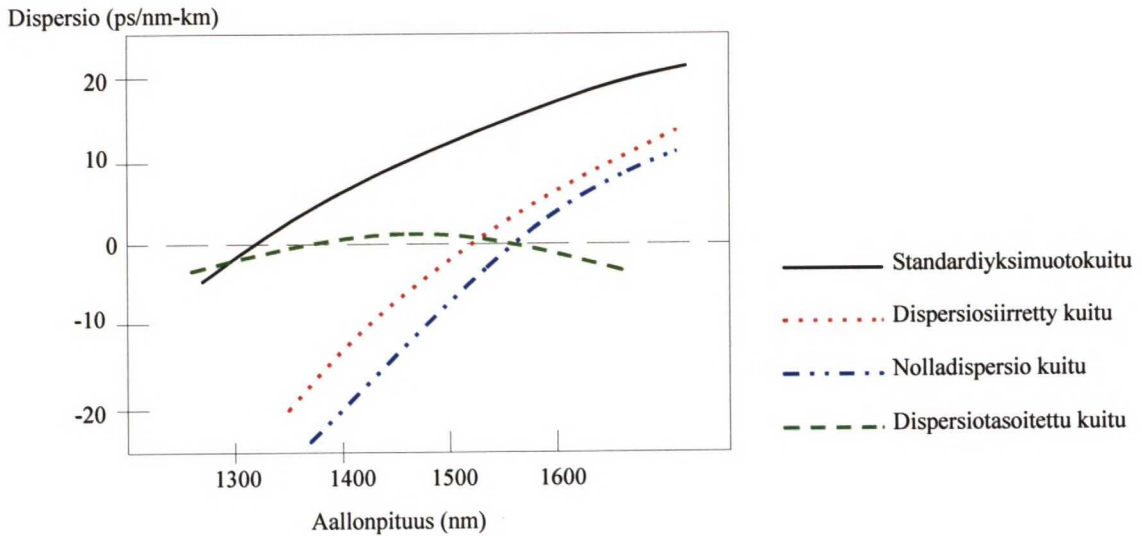
#### 4.3.1.1 Standardiyksimuotokuitu

Standardiyksimuotokuidussa dispersion (materiaalidispersio miinus aaltojohdedispersio) nollakohta on  $1,31\text{ }\mu\text{m}$ :n kohdalla ja vaimennusminimi  $1,55\text{ }\mu\text{m}$ :n kohdalla (ks. luku 3). Vaikka kuidun materiaali, piidioksidi, ei olekaan seostamattomana kovin epälineaarinen, aiheuttaa kuidun geometria (valo on rajoitettu kulkemaan pienessä alassa pitkän matkaa) sen, että myös epälineaariset ilmiöt tulevat merkityksellisiksi. Ilmiöiden merkitystä lisää entisestään bittinopeuden jatkuva kasvaminen.

Kuidun taitekertoimen intensiteettiriippuvuus aiheuttaa vaiheen itseis- ja ristimodulaatiota, jotka kasvattavat dispersiota. Standardiyksimuotokuidussa kanavat lisäksi dispersion seurauksena erkanevat toisistaan (*walk-off*), eivätkä esimerkiksi  $100\text{ GHz}$  kanavien välillä juurikaan ylikuulu. Dispersiosiiirretyissä kuiduissa kanavien erkanemista ei kuitenkaan tapahdu, sillä kanavat kulkevat likimääräisesti samoilla ryhmänopeuksilla, ja siksi näitä kuituja käytettäessä vaiheen ristimodulaatio voi olla merkittävä ongelma suurilla bittinopeuksilla ( $\geq 10\text{ Gb/s}$ ).

#### 4.3.1.2 Dispersiомуokatut yksimuotokuidut

Kuiduissa esiintyvä kromaattinen dispersio on luonteeltaan lineaarista ja se voidaan kompensoida eri menetelmillä. Esimerkiksi kuidun parametrejä muokkaamalla on mahdollista saada aikaan tilanne, jolloin aaltojohdedispersiokomponentti on negatiivinen ja itseisarvoltaan suuri verrattuna materiaalidispersiokomponenttiin. Näiden dispersiokomponenttien yhteisvaikutuksella voidaan dispersion nollakohta saada siirrettyä esimerkiksi aallonpituudelle  $1,55\text{ }\mu\text{m}$ . Tällöin puhutaan yleisesti nolla-dispersiokuidusta. Dispersion siirtoon tarvittavan kuidun määrän optisissa verkoissa määrää negatiivisen aaltojohdedispersiokomponentin suuruus. Jos se on onnistuttu valmistamaan hyvin suureksi, riittää suhteellisen lyhyt kuitu kompensoimaan materiaalidisersion.



**Kuva 4-5.** Yksimuotokuitujen kromaattinen dispersio aallonpituuden funktiona.

Nolladispersiokuitua on ollut kaupallisesti saatavilla vuodesta 1985 lähtien. Kuidun kehittämisen alkuaikoina ajateltiin, että se olisi ideaalinen vaihtoehto 1550 nm tiedonsiirtoon; dispersion nollakohta sijaitisi nyt samassa kohtaan kuin kuidun vaimennusminimi sekä erbium-seosteisen kuituvahvistimen vahvistuskaista. Myöhemmin kuitenkin huomattiin, että kuidun epälineaariset ilmiöt kasvavat ja sotkevat tilanteen varsinkin suurilla bittinopeuksilla [Ram+98].

Nolladispersiokuitua käytetään tällä hetkellä etupäässä valtamerien alaisissa verkoissa, joissa siirretään vain yhtä aallonpituutta tuhansia kilometrejä. Kaupunkialueen DWDM-järjestelmissä nolladispersiokuitujen käyttö ei välttämättä ole mielekästä, koska niiden vaimennus on noin 0,3 dB/km suurempaa kuin standardiyksimuotokuitujen. Tällöin vaimennuksen kasvaessa jouduttaiisiin käyttämään entistä enemmän kalliita erbiumkuituvahvistimia. Sen lisäksi näissä kuiduissa suuri vaiheen ristimodulaatio aiheuttaa ylikuulumista DWDM-kanavien välillä.

Jotta DWDM-järjestelmistä saadaan poistettua haitalliset epälineaariset ilmiöt, on kehitetty kuituja jotka tuottavat pienen kontrolloidun määrän dispersiota. Näissä dispersiosiiirretyissä kuidussa dispersio aallonpituudella 1,55  $\mu\text{m}$  on tyypillisesti noin 3 ps/nm km (mm. Corning, MetroCor NZDSF, *non-zero dispersion sifted fiber*). Tällaista kuitua käytettäessä ei törmätä samoihin epälineaaristen ilmiöiden aiheuttamiin ongelmiin kuin nolladispersiokuitujen tapauksessa, mutta dispersio on kuitenkin tarpeeksi pieni, jotta merkittävää pulssin levenemistä ei tapahdu. Lisäksi kuitujen vaimennus on suhteellisen pientä koko erbiumkuituvahvistimen C-kaistan alueella.

Kuituparametrejä muokkaamalla valmistetaan myös kuituja, joilla dispersio on pieni ja nollasta poikkeava koko 1,31-1,55  $\mu\text{m}$ :n aallonpituuskaistan. Näissä dispersiotasoitetuissa kuiduissa



sekä dispersion maksimi että minimi sijaitsevat välillä  $1,3 \mu\text{m} - 1,55 \mu\text{m}$  (ks. kuva 4-5). Dispersion minimillä saadaan hävitettyä neliäaltosekoittuminen, ja spesifioimalla dispersion maksimi saadaan dispersio pysymään pienenä, jotta ulkoista dispersion kompensointia ei tarvita. Myös tämä kuitu on käytössä lähinnä pitkällä siirtoetäisyyksillä, koska se on suhteellisen kallista verrattuna standardiyksimuotokuituun.

Kaupunkialueen verkoissa hyvä vaihtoehto voisi olla kuitu, jossa OH-ionien aiheuttamat absorptiopiikit (vesipiikit) on kokonaan poistettu. Näin saataisiin käyttöön mahdollisimman laaja aallonpituuskaista ja kanavien väliä voitaisiin kasvattaa. Karkeamman kanavien välin seurauksena säästetään verkon muissa komponenteissa, koska tällöin voidaan käyttää esimerkiksi halvempia multipleksereitä ja lähettämiä. Tällaisia kuituja on kaupallisesti saatavilla, mutta on havaittu, että ikääntymisen myötä vesipiikki kasvaa. Toisen vaatimuksen asettaa suuri bittinopeus, jonka seurauksena dispersion tulisi olla mahdollisimman tasainen aallonpituuden funktiona. Kaupunkialueella törmätään kuitenkin taas kustannuksiin; kuituvalinnalla pyritään mm. minimoimaan verkostointikulut minimoimalla kanavien lisäämisestä ja pudottamisesta aiheutuvat kustannukset. Jos kanavien määrä on valittu sopivan pieneksi, esimerkiksi kahdeksaksi, riittää standardiyksimuotokuidun kaistanleveys yleensä kaupunkialueen verkon tarpeeseen. Tämä on hyvä tilanne, sillä tavallisesti kaupunkialueella on valmiiksi vedettyä kuitua niin paljon, että verkon kapasiteetin huomattava lisäys onnistuu päivittämällä ainoastaan järjestelmiä.

### 4.3.2 Lähettimet

Lähetin muuntaa analogisen tai digitaalisen sähköisen signaalin vastaavaksi optiseksi signaaliksi, joka johdetaan kulkemaan pitkin optista kuitua. Lähetin voi olla joko ledi tai laser. Optisissa verkoissa käytetyiltä lähettimiltä vaaditaan paljon. Valon laadun kannalta lähettimen tärkeimpiä ominaisuuksia ovat koherenssi, monokromaattisuus ja ulostuloteho. Lähetintä pitää lisäksi pystyä moduloimaan ja ohjaamaan helposti sekä sen tulee olla stabiili.

Ledin emittoima valo on laajakaistaista ja sen käyttö kaupunkialueen DWDM-verkoissa ei ole mahdollista. Periaatteessa valo voidaan suodattaa kapeakaistaisella suodattimella, mutta tällöin hävitään liikaa tehotasossa. Lisäksi ledin suoramodulointi ei ole mahdollista kuin muutamalla sadalla megahertsillä, joka on aivan liian vähän vaadittaviin bittinopeuksiin. Tästä syystä paras lähetinvaihtoehto kaupunkialueen WDM-syöttöverkkoon on lediä huomattavasti kalliimpi laser. Lähiverkoissa lediä voidaan kuitenkin käyttää ja mielenkiintoinen toimiva ratkaisu on esitetty mm. viitteessä [Oks+02].

Lasertyyppejä on useita, mutta tässä työssä keskitytään suoramoduloituihin DFB-lasereihin ja elektroabsorbtiio-DFB-lasereihin. Lisäksi tarkastellaan hieman säädettäviä lasereita.



### 4.3.2.1 Suoramoduloidut puolijohdelaserit

Puolijohdelaserin eli laserdiodin toiminta perustuu elektronien ja aukkojen rekombinaatioon p-n rakenteen aktiivisessa alueessa sekä stimuloituun emissioon [Sin95]. Lisäksi tarvitaan takaisinkytkentää, eli kaviteetti, jossa elektronien ja aukkojen rekombinaation johdosta syntyneet koherentit fotonit heijastelevat ja vahvistavat jotain tiettyä aallonpituutta. Puolijohdelaserissa ei kaviteetin heijastavina pintoina tarvitse käyttää ulkoisia peilejä, koska halkaistu puolijohde-ilma rajapinta muodostaa tarpeeksi heijastavan rakenteen.

Laserdiodin materiaaliksi kelpaa periaatteessa mikä tahansa suoran energia-aukon puolijohde, mutta käytännössä materiaalien määrä on kuitenkin rajattu pieneen osaan yhdistepuolijohteita. Rajoituksen asettaa eri energia-aukon puolijohteiden välille muodostuvan heteroliitoksen hyvyys, joka määrää pitkälti laserdiodin suorituskyvyn [Agr97]. Materiaaleja, joiden hilavakiot on mahdollista sovittaa ja joista osataan valmistaa hyvälaatuisia puolijohteita ovat etupäässä kolmannen ja viidennen ryhmän alkuaineet kuten gallium, arseeni, indium, alumiini ja fosfori. Materiaalien valinnalla ja suhteella voidaan puolijohteen energia-aukko, ja tällöin samalla laserdiodin emittoivan valon aallonpituus, valmistaa sopiviksi.

Kaviteetin rakenteen perusteella puolijohdelaserit voidaan jakaa karkeasti neljään ryhmään: DFB-lasereihin, Fabry–Perot-lasereihin, ulkoisen kaviteetin lasereihin ja pintaemittiviin lasereihin. Näistä tällä hetkellä parhaiten WDM-järjestelmiin sopii DFB-laseri, jonka rakenteesta on mahdollista saada ulos tehokas ( $\sim 100$  mW) ja hyvin monokromaattinen lasersäde (spektrin leveys  $\sim 5$ -10 MHz). Kuitenkin pintaemittivia lasereita tutkitaan ja kehitetään kovasti, koska niissä on useita etuja päätyemittiviin lasereihin verrattuna. Yksi merkittävä etu on se, että laserdiodeja voidaan valmistuksen jälkeen testata kiekkoasolla. Pintaemittivien lasereiden ongelma on kuitenkin, että tällä hetkellä ei osata kaupallisessa mielessä valmistaa hyvälaatuista rakennetta, joka emittoisi valoa tietoliikenneaallonpituudella 1550 nm.

DFB-laserissa takaisinkytkentää ei tapahdu vain kaviteetin päätyseinistä (mikä on tilanne esim. Fabry–Perot-laserissa) vaan se on jaettu koko kaviteetin pituudelle. Tämä saadaan aikaan muodostamalla laserin aktiivisen alueen ulkopuolelle periodinen hilarakenne, jonka seurauksena myös kaviteetin taitekerroin vaihtelee periodisesti. Braggin diffraktioehdosta seuraa, että sallitut aallonpituudet määräytyvät hilaperiodin avulla.

WDM-järjestelmissä lähettimiltä vaaditaan monokromaattisuutta. Tähän läheisesti liittyvä suure on muodon vaimentumissuhde, MSR (*mode-suppression ratio*), joka määritellään

$$MSR = \frac{P_{mm}}{P_{sm}}, \quad (4.1)$$

missä  $P_{mm}$  on päämuodon teho ja  $P_{sm}$  on dominoivimman sivumuodon teho. DFB-rakenteilla, joissa hilaväli on vain aallonpituuden neljäsosa tai joissa hilaväli muuttuu periodisesti, MSR saadaan riittävän suureksi, jotta suoramodulointi on mahdollista.

Suoramoduloinnissa laserin injektiovirtaa säätämällä muodostetaan moduloitu signaali. Nollat ja ykköset saadaan aikaan lähetystehotason avulla. Jos halutaan lähettää ykkös-bitti, ajetaan laseria selvästi kynnysvirtaa suuremmalla virralla, kun taas nolla-bitin tapauksessa ohjausvirta on joko kynnystason suuruinen tai sen alle. Kynnysvirta on virta, jolla laseri alkaa laseroida. Suoramoduloinnin etu on sen helppous, mutta suurilla nopeuksilla suoramoduloinnin ongelmaksi muodostuu kasvava viserrys. Tämä johtuu siitä, että varauksenkuljettajatiheyden muuttuessa muuttuu myös aktiivisen alueen taitekerroin ja vahvistus: kun laser kytketään päälle, sen lähettämän valon aallonpituus saavuttaa vakioarvon vasta tietyn ajan kuluttua (*relaxation oscillation*). Tilanteessa jossa signaali kokee dispersiota, viserrys kasvattaa signaalipulssien leveyttä. Viserrystä voidaan vähentää mm. kasvattamalla nollabitin lähetystehoä siten, että laseria ajetaan koko ajan kynnysvirtaa suuremmalla virralla. Tämä johtaa kuitenkin sammutussuhteen pienenemiseen, joka taas huonontaa koko systeemin suorituskykyä. Nykyisin on kuitenkin kaupallisesti saatavilla DFB-lasereita, joita voidaan moduloida suoraan jopa yli 25 GHz:llä [Agr97]. Tämä on seurausta siitä, että puolijohteissa stimuloidun emission rekombinaatioaika on hyvin lyhyt.

#### 4.3.2.2 Elektroabsorptio-DFB-laseri

Elektroabsorptio-DFB (EA-DFB) on DFB-laserdiodi, jonka yhteyteen on integroitu elektroabsorptio-modulointiosa. Tämä rakenne pienentää taajuusviserrystä, koska laseria ajetaan koko ajan vakiovirralla ja nopean moduloinnin hoitaa erillinen modulaattori. Tällaisia kompakteja kustannustehokkaita lähettäjiä on kaupallisesti saatavilla esimerkiksi C-kaistalle 2,5 ja 10 Gb/s nopeuksilla.

EA-DFB-laserin taajuusominaisuuksia on tutkittu mm. viitteessä [Ish+96]. EA-DFB-laserin viserrys ominaisuuksia voidaan muokata muuttamalla elektroabsorptio-modulaattorin ohjaus- ja biasvirtaa. Nostamalla estoesijännitettä saadaan laserin viserrysparametri kasvamaan, mutta tällöin ulostuloteho pienenee. Myös sammutussuhde pienenee kun esijännite aiheuttaa positiivisemmän viserrysparametrin. Kromaattisen dispersion ja viserryksen yhteisvaikutus aiheuttaa pulssin kokoonpuristumista, jos dispersio on negatiivinen (esim. MetroCor NZDSF) ja viserrysparametri on positiivinen. Samoin pulssi kapenee, jos dispersio on positiivinen ja viserrysparametri negatiivinen.



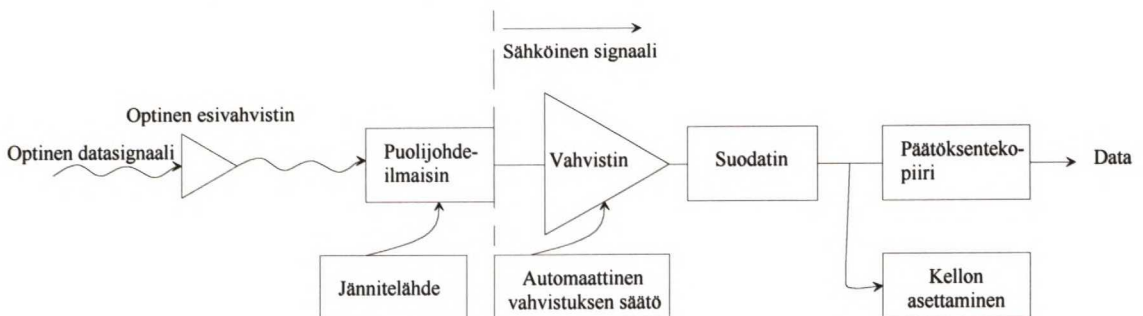
#### 4.3.2.3 Säädetävät laserit

Laserin emittoivaa aallonpituutta on mahdollista säätää lämpötilan, virran tai kaviteetin pituuden avulla. Kaviteetin pituuden muuttaminen onnistuu ulkoisen kaviteetin lasereissa ja Fabry–Perot-lasereissa esimerkiksi mikromekaanisesti. Emittoidun aallonpituuden lämpötilariippuvuutta käytetään yleisesti hyväksi DFB-lasereissa, joissa lämpötilan hallinta ja säätely voidaan toteuttaa esimerkiksi lämpövastuksella.

Nopein ja yleensä myös helpoin tapa on säädellä laserin injektiovirtaa. Perinteisessä laserdiodissa tämä aiheuttaa luonnollisesti myös ulostulotehon vaihtelua, mutta laser rakenteissa, joissa käytetään useaa ohjausvirtaa, tämä ongelma voidaan poistaa. DBR-laseria (*Distributed Bragg Reflector*), joka koostuu kolmesta eri osasta (aktiivinen alue eli vahvistusosa, vaiheen hallintiosasta ja Braggin-osa) voidaan säätää muuntelemalla kaviteetin efektiivistä taitekerrointa, jolloin Braggin ehdon mukaan myös ulostulosignaalin aallonpituus muuttuu. Rakenteen jokaiselle osalle tulee oma ohjausvirta, joita säätämällä saadaan efektiivinen taitekerroin muuttumaan. Jotta DBR-laserin emittoiva valo pysyisi monokromaattisena (MSR pysyisi isona), on aallonpituuden mahdollinen säätövara n. 5-6 nm:ä [Hil+95]. Suurempi säätövara saadaan, jos Braggin alue muodostetaan useista hiloista eli niin sanotusta superhilasta. Superhila koostuu joukosta pienempiä hiloja, jotka ovat vakio etäisyydellä toisistaan. Tällaista useasta hilasta koostuvaa DBR-laseria voidaan säätää diskreetisti jopa 100 nm:ä ja vaihekontrolliosan virtaa säätämällä myös kvasijatkuvasti 40 nm:ä [Ish+95]. Lisää tietoa säädettävistä lasereista löytyy mm. viitteissä [Sat+96] ja [FSE12/01].

#### 4.3.3 Vastaanotin

Vastaanotin on komponentti jonka avulla optinen signaali muutetaan saapuvan valovuon tehoa vastaavaan sähkövirtaan. Sähkövirta muutetaan edelleen jännitteeksi ennen päätöksentekopiiriä. Vastaanottimen kaavamainen rakenne on esitetty kuvassa 4-6.



Kuva 4-6. Vastaanottimen rakenne



Optisissa verkoissa käytetään yleensä puolijohdevastaanottimia. Tilanteesta riippuen valitaan joko PN-, PIN- tai vyörypurkausilmaisoin (APD, *avalanche photo detector*). PN-ilmaisoin on yksinkertaisesti pn-liitos ja PIN-ilmaisimessa p- ja n-kerrosten väliin on kasvatettu seostamaton puolijohdekerros. Sekä PN- että PIN-ilmaisimien kvanttihyötysuhde (saapuvien fotonien määrä / tuotettu sähkövirta) on korkeintaan 1. APD:ssa tapahtuu fotonien monistumista, jolloin vastaanotettu signaali vahvistuu ja kvanttihyötysuhde voi olla suurempi kuin yksi. Vastaanottimeen saapuvan bitin tunnistaminen tapahtuu päätöksentekolohkossa, jonka rakenne riippuu mm. käytettävästä moduloinnista.

Signaalin vastaanottamisen apuna voidaan käyttää optista esivahvistinta. Vahvistimen käyttö on välttämätöntä tilanteessa, jossa luvussa 3.6 esitetty tehobudjetti ei muuten toteudu. Kustannusherkillä kaupunkialueella esivahvistuksen käyttö tulee pyrkiä minimoimaan. Tällöin kuitenkin tasapainoillaan taas kalliiden ja tehokkaiden lähettimien sekä esivahvistimien välillä. Lähetytshon kasvattamisen esteenä ovat lisäksi mm. kuidun epälineaariset ilmiöt sekä mahdollisesti käytettävien optisten linja- tai esivahvistimien saturaatioituminen.

#### 4.3.4 Kytkimet

Optisissa verkoissa käytetään sekä passiivisia että aktiivisia kytkimiä. Signaalin reitittämiseen käytetään yleensä aktiivisia kytkimiä, kun taas passiiviset kytkimet eli haaroittimet sopivat mm. verkon liikenteen seurantaan. Aktiivisten optisten kytkinten toiminta perustuu joko mekaaniseen, sähköoptiseen tai termo-optiseen kytkentään. Puolijohdevahvistimesta voidaan lisäksi valmistaa on-off-kytkin, joka päästää valon lävitseen jos biasvirta on päällä ja absorboi sen jos bias ei ole kytkettynä.

Kun verkkoon ollaan valitsemassa kytkimiä, on kytkentäaika tärkeä parametri. Optisen suojauksen ja liikenteen sujuvan reitittämisen mahdollistava kytkentäaika on tyypillisesti 50 ms. Kytkentäajan lisäksi kytkinten kriittisiä parametreja ovat kytkentävaimennus, ylikuuluminen, polarisaation aiheuttama vaimennus (PDL, *polarization-dependent loss*) sekä on-off-kytkimissä sammutussuhde. Ylikuulumiset ja vaimennukset ovat aina ei-toivottuja ominaisuuksia, jotka saadaan kytkin teknologiasta riippuen poistettua vaihtelevalla menestyksellä.

$2 \times 2$  elektro-optisessa kytkimessä säädellään virralla suuntakytkimen taitekerrointa, jolloin saadaan myös kytkentäkerroin muuttumaan. Yksi yleisesti käytetty materiaali tällaisissa kytkimissä on litiumniobaatti ( $\text{LiNbO}_3$ ). Elektro-optisten kytkinten kytkentäaika on lyhyt ja suurempia kytkimiä voidaan integroida kytkemällä useita  $2 \times 2$  kytkimiä peräkkäin. Haittapuolena on suhteellisen suuri ylikuuluminen, PDL sekä korkea hinta.

Termo-optisten kytkinten toiminta on vastaava, mutta niissä aaltojohdemateriaalin taitekerrointa muutellaan lämpötilan avulla. Näitä kytkimiä on mahdollista valmistaa esimerkiksi piisubstraatile, mutta ne ovat hitaita ja ylikuuluminen on yleensä haitallisen suurta.

Mekaanisissa kytkimissä kytkentä tapahtuu esimerkiksi mikromekaanisesti säädettävien peilien avulla tai suuntakytkimen avulla. Suuntakytkimen haaran pituutta muokkaamalla saadaan signaali kytkettyä sisääntulosta haluttuun ulostuloon. Mekaaninen kytkimen toiminta voi perustua myös mekaaniseen sisään- ja ulostulokuitujen siirtelyyn. Tällaisten kytkinten kytkentäaika riittää luotettavaan optiseen suojaukseen, sekä lisäksi mekaaniset kytkimet ovat suhteellisen halpoja ja niiden kytkentähäviöt, ylikuulumiset ja PDL ovat pieniä.

### 4.3.5 Optiset vahvistimet

Optisten vahvistimien toiminta perustuu laserin tapaan stimuloituun emissioon. Niiden tärkein ominaisuus on vahvistus, joka on seurausta optisen tai sähköisen pumppauksen synnyttämästä populaatioinversiosta [Agr97]. Samalla vahvistimen tuottama kohina, joka on suurimmaksi osaksi spontaania emissiota, vahvistuu ja se pitää olla hallittavissa. Vahvistus riippuu yleisesti signaalilaserin aallonpituudesta ja intensiteetistä. Aallonpituusriippuvuutta kuvataan vahvistimen vahvistuskaistalla ja intensiteetti-riippuvuutta saturaatioteholla. Seuraavaksi esitellään hieman yksityiskohtaisemmin eri vahvistintyypit ja tarkastellaan niiden soveltuvuutta kaupunkialueen verkkoihin.

#### 4.3.5.1 Puolijohdevahvistin

Puolijohdevahvistin (SOA, *semiconductor optical amplifier*) on periaatteessa laserdiodi, josta on poistettu kaviiteetin heijastavat peilit. Vahvistin ei saa siis laseroida, mutta takaisinkytkentää tapahtuu käytännössä aina ja sitä voidaan jopa käyttää hallitusti hyväksi.

SOA:n vahvistuskaista on suhteellisen leveä verrattuna kuituvahvistimien kaistaan. Kaupallisesti puolijohdevahvistimia on saatavilla sekä 1,3  $\mu\text{m}$ :n että 1,55  $\mu\text{m}$ :n alueelle. Tyypillisesti SOA:n saturaatioteho on luokkaa 5-10 mW ja kohinaluku 5-7 dB [Agr97]. Yleisesti SOA:n kohina on tarpeeksi pientä tietoliikennesovelluksiin mutta saturaatioteho ei riitä, varsinkin jos vahvistinta käytetään usean kanavan samanaikaiseen vahvistamiseen. SOA:n muita heikkouksia ovat polarisaatioriippuvuus sekä se, että valon kytkeminen vahvistimeen ja takaisin kuituun on vaikeaa. Aina kun käytetään muita kuin kuitukomponentteja, törmätään kytkemisongelmaan: valon kytkeminen yksimuotokuituun on kallista ja vaikeaa. SOA:n polarisaatioriippuvuus (vahvistusero TE ja TM muotojen välillä) on jopa 7 dB ja parhaimmissakin ratkaisuissa päästään vain hieman alla yhden desibelin.



SOA:n yksi suuri ongelma on myös sen nopea dynamiikka, joka johtuu puolijohdeiden varauksenkuljettajien lyhyestä elinajasta. Nopea dynamiikka aiheuttaa mm. kanavan sisäistä ylikuulumista. Optiselle puolijohdevahvistimelle on kuitenkin löytynyt signaalivahvistimen sijaan monta muuta käyttöä verkoissa mm. epälineaarisenä elementtinä useissa sovellutuksissa, nopeana kytkimenä aallonpituusreititetyissä verkoissa sekä siitä voidaan valmistaa aallonpituusmuunnin.

#### 4.3.5.2 Planaariset valokanavavahvistimet

Planaarinen valokanavavahvistin on yleensä piidioksidikanava, joka on seostettu vahvistavalla aineella. Seostusmateriaaleina voidaan käyttää periaatteessa samoja aineita kuin kuituvahvistimissa. Lupaavia tuloksia C-kaistan vahvistamiseen on saatu vahvistimista, joissa erbiovia on seostettu SOI-kiekolle (*silicon-on-insulator*) tehtyihin kanaviin (EDWA, *erbium-doped waveguide amplifier*) [FSE2/02], mutta näiden vahvistimien kaupallistuminen vie vielä aikaa. Samalle sirulle voidaan integroida monta EDWA:a sekä lisäksi mm. haaroittimia ja pumppu-WDM. Sirulle on periaatteessa mahdollista lisätä myös pumppulaseri, joten vahvistimesta on mahdollisuus valmistaa hyvin kompakti paketti. Tällainen vahvistin voisi olla toimiva ratkaisu kaupunkialueen verkon solmuissa, joissa tarvitaan suuri määrä pienitehoisia ja -kokoisia sekä edullisia vahvistimia.

#### 4.3.5.3 Kuituvahvistimet

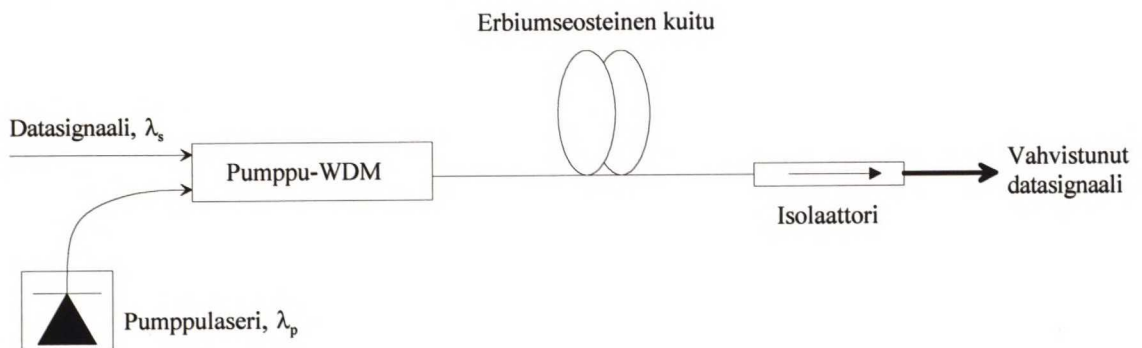
Kuituvahvistimet voidaan erotella kolmeen kategoriaan: harvinaisilla maametalleilla seostettuihin, sirontaan perustuviin sekä parametrisiin kuituvahvistimiin. Kahdessa viimeksi mainitussa vahvistintyyppissä käytetään hyväksi optisen kuidun epälineaarisia ilmiöitä: sirontaan perustuvissa stimuloituja Brillouin- (BFA, *Brillouin fiber amplifier*) ja Raman-sirontaa (RFA, *Raman fiber amplifier*) sekä parametrisissa vahvistimissa neliäaltosekoittumista. BFA:ssa ja RFA:ssa heikko vahvistettava signaali vaelttaa pitkin kuitua yhdessä voimakkaan pumppusignaalin kanssa. Näissä vahvistimissa vahvistettavan signaalin aallonpituus tulee olla pumppulaserin Raman- tai Brillouin-vahvistuskaistan sisällä. BFA:n vahvistuskaista on kapea (15 – 50 MHz) kun taas RFA:n kaistanleveys voi olla jopa yli 7 THz. Kuitenkin RFA vaatiin hyvin voimakkaan pumppusignaalin (1 – 10 W). BFA:n toimintaan riittää puolestaan muutaman milliwatin pumpputeho. Suuren vaadittavan pumpputehon lisäksi RFA:n heikkous on sen hyvin nopea dynamiikka ja etu on mm. mahdollisuus säätää vahvistuskaistaa jatkuvasti. Myös neliäaltosekoittumiseen perustuvat parametriset vahvistimet vaativat tehokkaan pumppulaserin ja niiden käyttö optisissa verkoissa painottuu vain joihinkin erikoissovelluksiin, kuten dispersion kompensointiin. Lisää epälineaarisia ilmiöihin perustuvista kuituvahvistimista löytyy liitteestä [Agr95].

Merkittävin kuituvahvistin kategoria on harvinaisilla maametalleilla seostetut kuituvahvistimet, joista yleisimmin käytetty on erbiumkuituvahvistin. Erbiumin lisäksi kuituvahvistimien



seostamiseen käytettäviä harvinaisia maametalli-ioneja ovat mm. neodyymi ( $\text{Nd}^{3+}$ ) ja praseodyymi ( $\text{Pr}^{3+}$ ). Seostusioneista riippumatta maametalliseosteisten kuituvahvistimen toiminta on samanlaista. Praseodyymia ja käytetään 1,3  $\mu\text{m}$ :n kaistan vahvistamiseen ja neodyymiä hyvin suuritehoisten lasereiden vahvistavana seosteena. Praseodyymikuituvahvistimen yksi ongelma on sopivan pumppulaserin löytäminen, koska vaadittava pumpun aallonpituus on eksoottinen 1017 nm. Lisäksi se valmistetaan piidioksidilasin sijaan fluoridilasiin, jonka käsittely on huomattavasti vaikeampaa. Neodyymivahvistimien heikkous puolestaan on pieni vahvistus [Bja93].

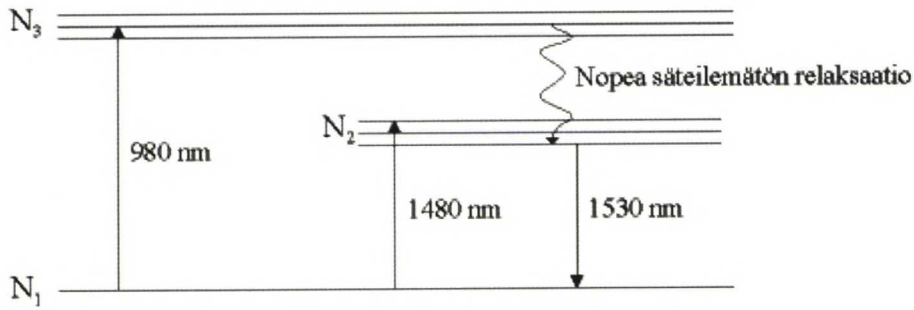
Erbiumseosteista kuituvahvistinta käytetään tärkeimmän tietoliikenne- aallonpituuskaistan eli C-kaistan vahvistamiseen. EDFA:n vahvistuskaista on myös kuidun pituutta ja seostusta muokkaamalla mahdollista laajentaa ylettymään L-kaistalle (1575-1610 nm). EDFA:n rakenne on esitetty kuvassa 4-7.



Kuva 4-7. Erbiumkuituvahvistimen rakenne.

Kuvan 4-7 EDFA on myötäsuuntaan pumpattava eli vahvistettava signaali ja pumppusignaali etenevät kuidussa samaan suuntaan. Vaihtoehtoisia rakenteita ovat vastasuuntaan pumpattava tai molemmista suunnista pumpattava EDFA. EDFA koostuu pumppulaserista, pumppu-WDM:stä, erbiumkuidusta sekä isolaattorista. Pumppu-WDM yhdistää datasignaalin ja pumppusignaalin yhteen kuituun. Isolaattorin tarkoitus on estää haitalliset takaisinheijastukset. Käytännössä EDFA:n yhteyteen lisätään vielä esimerkiksi 10/90-haaroitin tehon tarkkailua varten sekä vaimennin tehon tasaamiseksi. Tehon tasaaminen on erityisen tarpeellista silloin, kun WDM-verkossa kytketään useita vahvistimia ketjuun. Jos kanavien tehoja ei vahvistettaessa tasata, saapuu seuraavaan vahvistimeen eri tehoisia signaaleja ja vahvistusspektrin kaltevuus kasvaa (kanavien tehoerot kasvavat).

Erbiumilla seostettu kvartsilasi muodostaa kolmetasoisen energiavyörakenteen (kuva 4-8).



**Kuva 4-8.** EDFA:n energiadiagrammi.

Kuvassa tila 1 on perustila, tila 2 on metastabiili viritystila ja tila 3 on viritystila, jonka kautta 980 nm pumpulla ionit relaksoituvat nopeasti tilalle 2. 1480 nm pumpulla  $\text{Er}^{3+}$ -ionit virittyvät suoraan metastabiilin tilan ylimmille alitiloille. Kuvassa 4-5  $N_i$  tarkoittaa tilan  $i$  populaatio- tiheyttä. Termisessä tasapainossa pätee  $N_1 > N_2 > N_3$ . Pumpun avulla saadaan kuitenkin aikaan populaatioinversio ( $N_2 > N_1$ ), joka mahdollistaa signaalin vahvistamisen. Metastabiilin tilan elinaika on pitkä (luokkaa 10 ms). Viritystilalta ionit relaksoituvat perustilalle emittoiden fotonin. Viritystila on äärellisen leveä energiavyö, joka koostuu useista alitiloista. Vyön leveneminen johtuu mm. Starkin-ilmiöstä [Des94]. Metastabiilin viritystilan kaikkien alitilojen sekä perustilan väliset siirtymät vastaavat juuri haluttua vahvistuskaistaa eli 1525-1575 nm. Kuidun vahvistava ominaisuus perustuu siis stimuloituun emissioon, jolloin signaalifotoni monistuu kahdeksi identtiseksi fotoniksi viritystilan purkautuessa. Ionin relaksoituminen satunnaiseen aikaan on spontaania emissiota, joka vahvistuessaan aiheuttaa ASE-kohinaa.

Yksinkertainen tulkinta EDFA:n dynamiikalle saadaan, jos ajatellaan metastabiilin tilan elinajan käänteisluvun olevan nopein mahdollinen vahvistuksen vaihtelunopeus. Käytännössä EDFA:n transientti-ilmiöitä voi tapahtua satojen mikrosekuntien aikaskaalassa, jolloin niitä ei voi ennustaa pelkän elinajan avulla. Joka tapauksessa noin 100  $\mu\text{s}$ :a nopeammat signaalin vaihtelut eivät aiheuta EDFA:ssa ylikuulumista. Tämä vastaa bittinopeutta  $\sim 10$  kb/s, joka on siis pyrittävä ylikuulumisen takia ylittämään. Ylikuulumisen poissaolo suurilla bittinopeuksilla onkin yksi EDFA:n vahvuuksia mm. puolijohdevahvistimeen verrattuna.

Optisen kuituvahvistimen vahvistus voidaan laskea joko yhtälöllä 3.6 tai vahvistuskertoimen  $g(v_s)$  avulla yhtälöllä

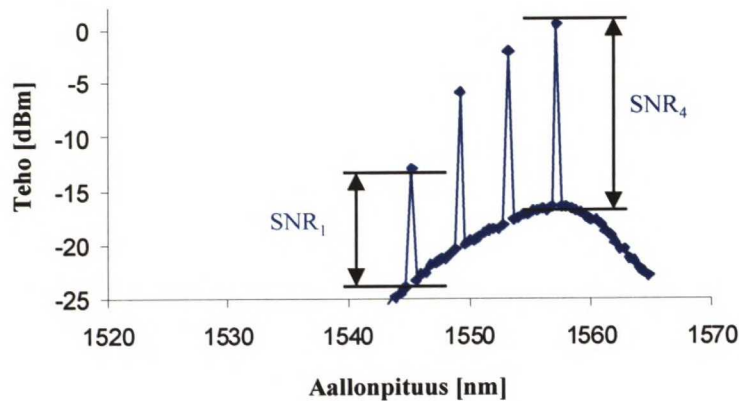
$$G(v_s) = \exp[g(v_s)L], \quad (4.2)$$

missä  $L$  on vahvistavan kuidun pituus. Määrätyllä kuidun rakenteella ja seostuksella sekä määrätyllä pumpputeholla löydetään kuidun optimipituus vahvistuksen maksimoimiseksi. Optimipituutta lyhyempi kuitu ei käytä maksimaalisesti pumpputehoa ja kvanttihyötysuhde laskee. Optimia pidemmällä kuidulla puolestaan pumpputeho ei riitä synnyttämään täydellistä populaatioinversiota koko kuidun pituudelle ja vahvistettava signaali alkaa vaimentua.

Vahvistuskertoimen  $g(v_s)$  arvo riippuu vahvistavasta väliaineesta ja se on oleellisesti erilainen pienillä ja suurilla signaalin sisäänmenotehoilla. Toisin sanoen  $g(v_s)$ :n arvo riippuu vahvistimen saturaatiotasosta. Vahvistin toimii saturoimattomalla piensignaali-alueella, jos pumppausnopeus on paljon suurempi kuin stimuloitun emission nopeus. Tällaisissa olosuhteissa populaatio-inversio on vakio koko erbiiumkuidun matkalla ja piensignaali-vahvistus pysyy hyvin vakiona. Signaalitehon kasvaessa stimuloitu emissio alkaa kilpailla pumppauksen kanssa ja vahvistin satureituu. Tällöin vahvistin toimii suursignaali-alueella ja sisäänmenotehon kasvaessa vahvistus pienenee.

Saturaatio-ulostuloteho  $P_{\text{sat}}$  määritellään tehona, jolloin vahvistimen vahvistus on tippunut 3 dB. Saturaatio saavutetaan sitä nopeammin mitä suurempi vahvistimeen sisäänmenevä signaali on ja toisaalta mitä suurempi on vahvistimen saturoimaton vahvistus. Saturaatioon vaikuttaa myös vahvistunut spontaani emissio. Pienillä sisäänmenosignaalin tehotasoilla voi esiintyä itseissaturaatiota, jolloin nimenomaan ASE-kohina saturei vahvistimen.

Saturaatio on epälineaarinen ilmiö ja se voi aiheuttaa optisissa WDM-verkoissa paljon ongelmia. Yksi ongelma on se, että yksittäisen kanavan satureitunut vahvistus riippuu oman kanavan tehon lisäksi kaikkien muidenkin kanavien tehoista, joka aiheuttaa tehon varastamista (*power-stealing*). WDM-verkoissa EDFA:t toimivat yleensä suursignaali-alueella, jolloin vahvistus riippuu siis voimakkaasti sisäänmenotehosta. EDFA:n hitaasta vahvistusdynamikasta johtuen kanavien lisääminen ja pudottaminen aiheuttaa vahvistimen vahvistusspektrin kaltevuutta ja muiden kanavien välille syntyy vahvistusepätasapaino [Ylä99] (ks. kuva 4-9). Ongelma voidaan korjata dynaamisella vahvistuksensäädöllä. Tämä voidaan toteuttaa lukitsemalla teho optisella takaisinkytkennällä [Zir93], nopealla pumpputehon säädöllä [Sri+96] tai lisäämällä EDFA:n sisäänmenoon kompensointisignaali [Zys+96].

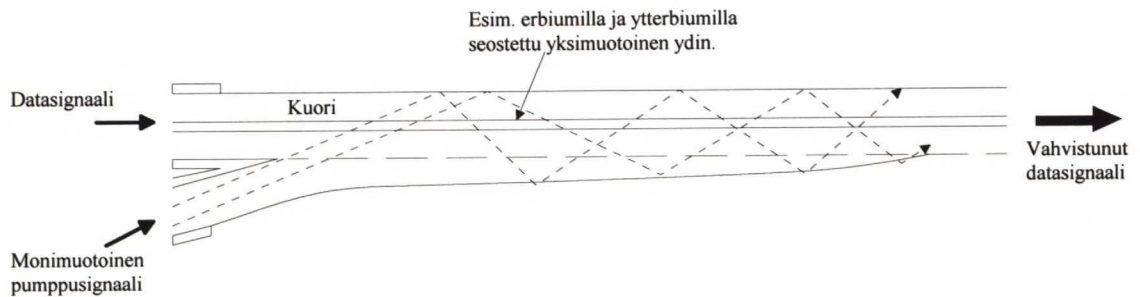


**Kuva 4-9.** EDFA:n vahvistusspektri suursignaali-alueella. Vahvistusspektrin kaltevuus saa aikaan kanavien välille vahvistusepätasapainon sekä signaali-kohinasuhteen vaihtelun.



Myös kuituvahvistimien yksi suuri ongelma on niiden aiheuttama akkumuloituva kohina. Käytännössä verkoissa käytettävien vahvistimien kohinaluku on luokkaa 4-8 dB. Optisen vahvistimen kohinaluku voidaan määrittää kokeellisesti mm. viitteessä [Kai02] demonstroidulla automatisoidulla mittauskytkennällä.

Seostettujen kuituvahvistimien pumppaukseen on olemassa myös edullisempi vaihtoehto, ns. kuoripumppaus. Tämä tekniikka synnyttää kustannussäästöjä, koska siinä pumppaukseen voidaan käyttää edullisempia laaja-alaisia pumppudiodeja. Kuoripumpattavan kuituvahvistimen toimintaperiaate on esitetty kuvassa 4-10.



**Kuva 4-10.** Kuoripumpattava kuituvahvistin. Laaja-alaisella monimuotopumpulla siirretään energiaa yksimuotokuidun ytimeen.

Kuoripumppauksessa monimuotoinen pumppukuitu ja yksimuotoinen signaalikuitu on hitsattu yhteen. Vaikka monimuotoisen pumppusignaalin säde on suuri, saadaan se nykytekniikalla kytkettyä tehokkaasti monimuotokuituun ja siitä edelleen yksimuotokuidun kuoreen. Joka kerta kun pumppusignaali kulkee yksimuotokuidun ytimen läpi osa sen tehosta absorboituu esimerkiksi ytimeen seostettuihin ytterbium-ioneihin. Tätä tehoa voidaan puolestaan käyttää ytimessä vaeltavan signaalin vahvistamiseen. Teho voidaan myös siirtää esimerkiksi kuituun seostetuille erbium-ioneille, jolloin vahvistuskaistaa saadaan siirrettyä. Jos pumpputehoa tarvitaan lisää, voidaan yksimuotokuidun kylkeen hitsata useampiakin pumppauskuituja.

#### 4.3.6 Optiset suodattimet

Suodatin voi olla joko passiivinen, jolloin se päästää lävitseen tai poistaa tietyn kanavan/aallonpituuskaistan, tai aktiivinen, jolloin suodattimen päästö/estokaistaa on mahdollista säätää. Yleisesti suodattimen toiminta perustuu joko diffraktioon tai interferenssiin. Yksi yksinkertainen säädettävä suodatin on Fabry–Perot-interferometri, jossa säätö tapahtuu heijastavien pintojen etäisyyttä muuttamalla. WDM-verkoissa suodattimia käytetään mm. vahvistimien kohinan suodattamiseen ja signaalien reitittämiseen (ks. luku 6). Lisäksi suodattimia käytetään usean monimutkaisemman WDM-komponentin rakennesoia.

Passiivisia suodattimia voidaan valmistaa useaan eri teknologiaan perustuen, mutta pääryhmät ovat kuituoptiset suodattimet ja ohutkalvosuodattimet. Komponentiteknologian määrää verkolle asetetut vaatimukset. Tärkeitä suodattimen ominaisuuksia ovat kytkentävaimennus, ylikuuluminen, polarisaatioherkkyys, stabiilisuus ja tietysti hinta. Ylikuulumisella tarkoitetaan tässä yhteydessä päästö/estokaistan reunan jyrkkyyttä ja ideaalisuodattimen vaste on laatikkomainen.

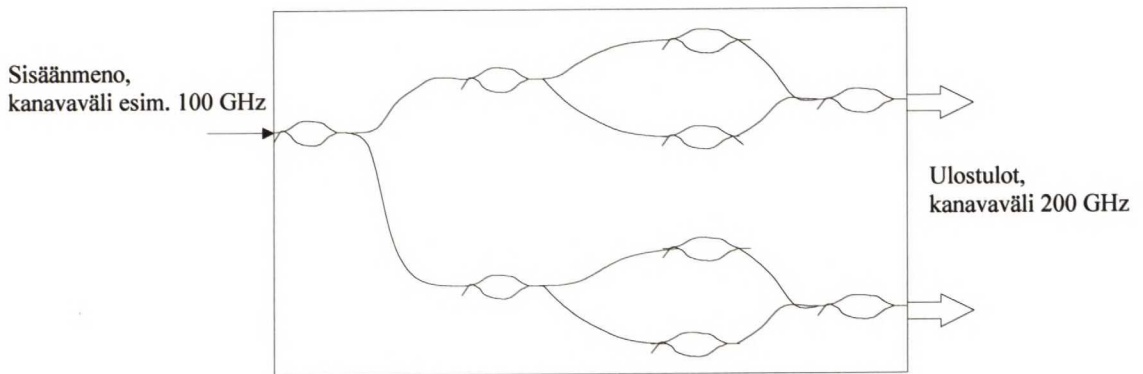
Kuituoptinen Braggin-hila, FBG (*Fiber Bragg Grating*), on suodatin, jonka toiminta perustuu Braggin-ilmiöön. Braggin-hila heijastaa saapuvasta signaalista takaisin yhden tai useamman aallonpituuden hilaperiodin mukaan. FBG on siis aallonpituusselektiivinen peili. FBG valmistetaan kirjoittamalla hilarakenne kuidun valoherkkään ytimeen esimerkiksi UV-valolla.

AWG (*Arrayed Waveguide Grating*) on puolijohdekielekolle integroitu staattinen aallonpituusreititin. AWG sisältää polkuja, joiden pituudet eroavat hieman toisistaan. Komponentin sisäänntuloon saapuvat signaalit reititetään ulostuloportteihin aallonpituuksien mukaan. Polkujen matkaero saa aikaan kanavien välille vaihesiirtymän, joka puolestaan saa aikaan sen, että samaan sisäänntuloon saapuvat signaalit saapuvat eri ulostuloihin. Kaupalliset AWG:t on valmistettu yleensä kolmannen ja neljännen ryhmän puolijohteista. Normaalisti näiden komponenttien kanavien välit ovat 100 GHz tai 50 GHz ja kytkentähäviöt esimerkiksi 16 kanavaisessa AWG:ssa luokkaa 7 dB [Ste+99]. AWG:n heikkous on, että se vaatii tavallisesti lämpötilan kontrollointia.

### 4.3.7 Vuoroerotin (*interleaver*)

Optista vuoroerotinta voidaan käyttää optisissa verkoissa kanavien limittämiseen ja kanavälin kasvattamiseen. Vuoroerotin on kolmeporttinen komponentti, joka erottelee sisäänntulevasta WDM-signaalista kanavat kahteen eri ulostuloon (parittomat kanavat toiseen ja parilliset toiseen). Tällöin molempien ulostulojen kanavaväli on kaksinkertainen sisäänntulon kanavaväliin nähden. Vuoroerotinta voidaan käyttää tietysti myös multiplekserinä kytkemällä WDM-signaaleja ulostuloista sisäänntuloon.

Vuoroerotin toiminta perustuu rinnan ja sarjaan kytkettyihin Mach-Zender-interferometreihin (kuva 4-11). Mach-Zender-interferometrissä saapuva signaali jaetaan säteenjakajalla kahteen haaraan joiden optiset pituudet poikkeavat toisistaan. Seuraavaksi haarat yhdistetään toisella säteenjakajalla, jolloin kanavat kytkeytyvät aallonpituudesta riippuen jompaan kumpaan seuraavan interferometrin sisäänntulohaaraan. Passiivisessa vuoroerotinissa haarojen pituudet on mitoitettu sopiviksi halutun toiminnon aikaansaamiseksi.



**Kuva 4-11.** Vuoroerotin demultipleksoi optiset WDM-kanavat vaiheittain Mach-Zender-interferometrien avulla.

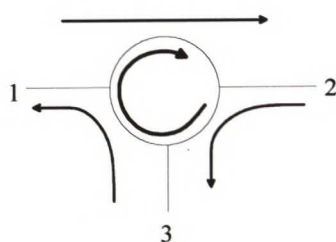
Vuoroerotin on hyödyllinen komponentti optisten verkkojen solmupisteissä ja sitä on käytetty myös tämän työn koeverkossa.

#### 4.3.8 Isolaattori ja sirkulaattori

Isolaattori ja sirkulaattori eivät ole resiprookkisia komponentteja, eli ne eivät toimi samalla tavalla signaalin kulkiessa komponentin läpi vastakkaisiin suuntiin. Tällaisille komponenteille on verkossa paljon käyttöä, mutta ehkä yksinkertaisin sovellus on isolaattorin käyttö EDFA:n tai laserdiodin ohessa. Jos EDFA on sijoitettu verkkoon vahvistamaan signaalia, joka kulkee oikealta vasemmalle, se vahvistaa myös vasemmalta oikealle etenevää signaalia. Laserdiodiin takaisinheijastunut signaali toisaalta huonontaa lähettimen suorituskkyä merkittävästi. Valitettavasti verkossa esiintyy aina myös näitä väärään suuntaan eteneviä signaaleja. Ne syntyvät mm. takaisinheijastuksista verkon solmupisteistä tai kuituliitoksista. Jotta nämä takaisinheijastuneet signaalit eivät huonontaisi verkon suorituskkyä tarvitaan isolaattoria, joka päästää lävitseen toiseen suuntaan etenevän signaalin mutta estää signaalin kulun vastakkaiseen suuntaan. Yleisesti isolaattorin toiminta perustuu valon polarisaatioon ja sen muunteluun. Kaupallisten isolaattoreiden vaimennus, isolaatio, väärään suuntaan etenevälle signaalille on luokkaa 30-50 dB ja kytkentähäviö oikeaan suuntaan etenevälle signaalille luokkaa 1-4 dB.

Sirkulaattorin toiminta on vastaava kuin isolaattorin, mutta se sisältää kolme tai neljä porttia. Kolmeporttisen sirkulaattorin toimintaa havainnollistaa kuva 4-12.





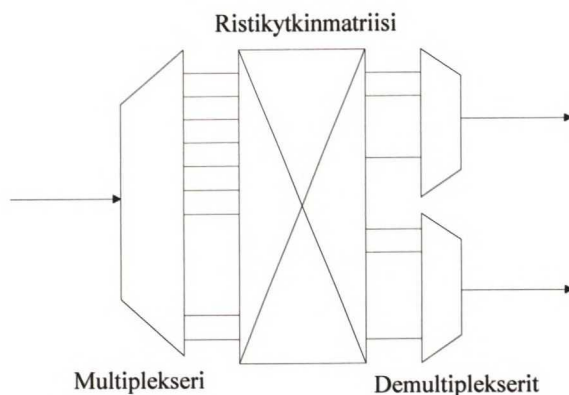
**Kuva 4-12.** Kolmeporttisen sirkulaattorin toimintaperiaate.

Kuvan 4-12 esittämällä tavalla sirkulaattori kytkee signaalin portista 1 porttiin 2, kun taas portista kaksi saapuva signaali kytkeytyy porttiin 3.

#### 4.3.9 Optiset kanavien lisäys/pudotuskomponentit ja ristikytkimet

Kanavien lisäys/pudotuskomponentti (OADM, *optical add/drop multiplexer*) on yksi WDM-verkon tärkeimmistä elementeistä. OADM ei ole mikään yksittäinen komponentti vaan se rakentuu muista WDM-komponenteista. Sitä käytetään verkossa liikkuvien kanavien tai kanavaryhmien reitittämiseen, tiputtamiseen tai lisäämiseen. Tällä hetkellä kaksi johtavaa OADM rakennetta perustuvat kuituoptisiin Braggin-hiloihin (kaistanpäästösuodatin) ja ohutkalvosuodattimiin. Seuraavassa luvussa on esimerkki OADM:stä, joka on toteutettu Braggin-hilan ja sirkulaattorin yhdistelmällä.

OADM on mahdollista toteuttaa myös kytkinmatriisien ja multipleksereiden avulla (kuva 4-13). Ristikytkimiin ja multipleksereihin pohjautuvat ratkaisut eivät ole kuitenkaan esimerkiksi skaalattavuuden mielessä niin käytännöllisiä kuin suodattimiin perustuvat ratkaisut.



**Kuva 4.13.** OADM, jonka toiminta perustuu ristikytkimiin ja multipleksereihin.

Optinen ristikytkin on komponentti, joka kytkee sisääntulevasta WDM-signaalista eri ulostuloihin signaalit aallonpituuksien perusteella. Tällaisia kytkimiä voidaan valmistaa esimerkiksi MEMS-teknologiaan (*micro-electro-mechanical systems*) ja AWG-komponenttiin

pohjautuen. MEMS-tekniikalla valmistetaan suuri määrä pieniä mikromekaanisesti liikuteltavia peilejä kytkimeksi ja AWG:tä käytetään kanavien reitittämiseen. Tällaisen kytkimen valmistaminen on kuitenkin vaikeaa ja kallista.

## 5 Kokeellisia WDM-kaupunkiverkkoja

Tässä luvussa esitellään kolme mielenkiintoisia eri tutkimusryhmän toteuttamaa optista kaupunkialueen syöttöverkkoa. Esiteltävien verkkojen valinnassa on pyritty siihen, että ne antaisivat laajan kuvan kaupunkialueen syöttöverkon toteuttamismahdollisuuksista. Luvun tehtävä ei ole pohjustaa koeverkon toteuttamista vaan mm. eliminoida huonot ratkaisut, jotta samoja virheitä ei enää toistettaisi.

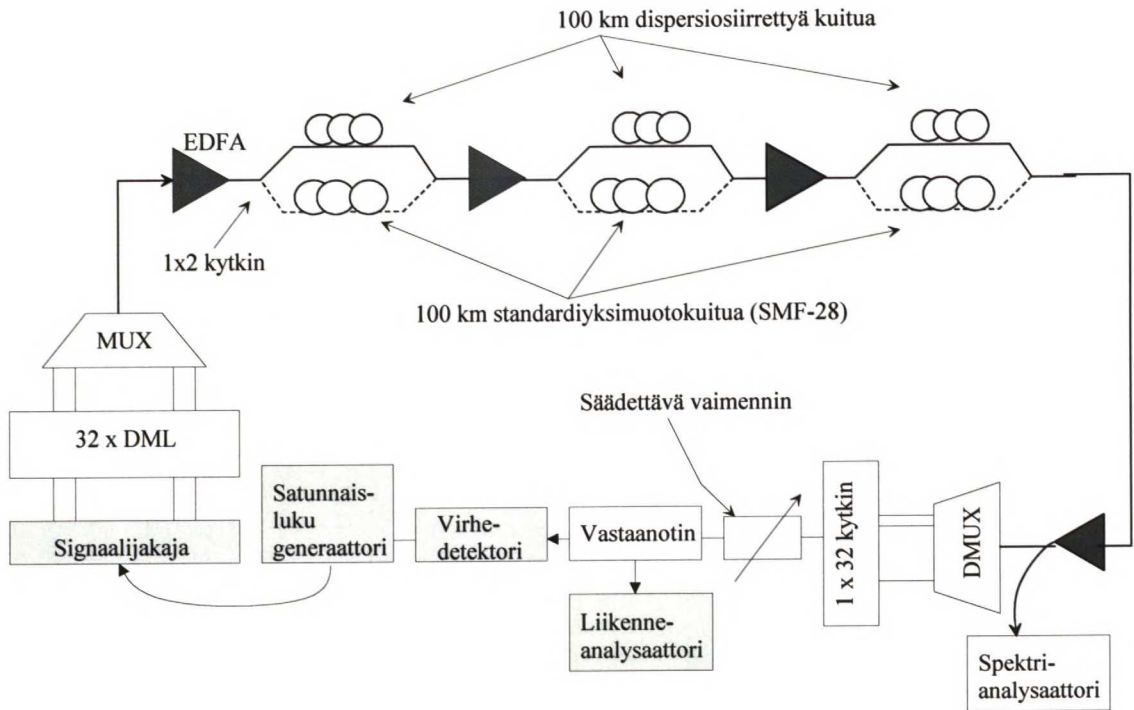
### 5.1 Dispersiosiiirretty kuitu kaupunkialueen WDM-verkossa

Tämä verkko on demonstroitu artikkelissa [Tom+01]. Artikkelissa esitetään yksityiskohtaisesti dispersiosiiirrettyyn kuituun (NZDSF, *non-zero-dispersion shifted fiber*) perustuva kaupunkialueen syöttöverkko. NZDS-kuituun on jätetty pieni määrä negatiivista dispersiota 1,5  $\mu\text{m}$ :n alueelle. Työssä on käytetty sekä 1,3  $\mu\text{m}$ :n ja 1,55  $\mu\text{m}$ :n aallonpituusikkunoita että 2,5 ja 10 GHz:n bittinopeuksia. Työssä demonstroidaan 300 km regeneroimaton siirtoetäisyys 2,5 GHz suoramoduloiduilla DFB lasereilla. 10 GHz:n bittinopeus puolestaan saavutetaan ulkoisella Mach-Zender-modulaattorilla ja elektroabsorptio-DFB-laserilla. Näillä on päästy yli 200 km:n siirtoetäisyyksiin sekä 100 että 200 GHz kanavien välillä.

Suurilla bittinopeuksilla dispersion aiheuttama pulssimuodon huonontuminen on merkittävä verkonsuunnittelijoiden ongelma ja dispersion kompensointi voidaan toteuttaa juuri dispersiosiiirretyllä kuidulla. Silloin ei tarvita dispersionkompensointimoduuleita, joiden sijoittelu verkkoon voi olla ongelmallista. Ensimmäinen ongelma on se, että verkon eri kanavat voivat olla lähtöisin eri solmuista, ja siksi kanavat kokevat erisuuruisen määrän dispersiota. Toiseksi moduulit kasvattavat verkon kohinalukua ja häviöitä.

Artikkelissa esitellään kokeellinen tulos, jossa 32-kanavinen DWDM-systeemi on toteutettu sekä standardiyksimuotokuituun että MetroCor NZDS-kuituun perustuen. Käytetty siirtonopeus on 2,5 Gb/s ja lähettiminä käytetään sekä suoramoduloituja että elektroabsorptio-DFB-lasereita. Koejärjestelyn kaavio on piirretty kuvaan 5-1. Käytettävät kanavat sijaitsevat C-kaistalle, jossa MetroCor kuidulla on suurempi absoluuttinen dispersio. Kanavien aallonpituudet ovat ITU-jaon mukaan 100 GHz:n välein välillä 1533,5 nm – 1558,2. Kuidun valintaan käytetään optisia ristikytkimiä (joko 300 km standardiyksimuotokuitua tai 300 km NZDS-kuitua). Järjestelmässä käytetään DWDM-verkkoon optimoituja erbiiumkuituvahvistimia, joiden ulostuloteho on 14

dBm. Keskimääräinen kanavien lähetysteho on -3 dBm ja kaikkien 32 kanavan optinen signaali-kohinasuhde on 0,1 nm:n kaistalla yli 23 dB.



**Kuva 5-1.** Mittauskytkentä MetroCor NZDSF kuidun ja standardiysimuotokuidun siirto-ominaisuuksien vertailuun.

Siirto-ominaisuuksia on analysoitu mm. herkkyysluonnon avulla. 300 km jälkeen MetroCor kuidussa kaikkien 32 kanavan herkkyysluonnon bittivirhesuhteen  $10^{-10}$  saavuttamiseksi on negatiivinen (luokkaa 0,3-1,5 dB), joka osoittaa verkon suorituskvyn parantumista. Toisaalta standardiysimuotokuitu aiheuttaa merkittävää herkkyysluonnusta (yli 4 dB) ja 24 kanavan herkkyysluonnon on jopa yli 10 dB. Kanavien herkkyysluonnusten vaihtelu osoittaa, että herkkyysluonnon riippuu vahvasti käytettävästä lähettimestä. Kanavien lähettimien siirto-ominaisuuksia on karakterisoitu vastaanotettujen teho- ja viserrys-aaltomuotojen avulla. Karakterisointi osoittaa, että osaa lähettimistä dominoi transientti-viserrys ja osaa adiabaattinen viserrys.

On huomattavaa, että kokeen tekijät ovat yhtiöstä, joka valmistaa dispersiosirrettyä kuitua. Tästä syystä artikkeliin tulee suhtautua varauksella, sillä kokeen taustalla on varmasti myös halu myydä kuitua asiakkaille. Toisaalta koe osoittaa, että NZDS-kuitu parantaa verkon suorituskvyyä varsinkin suurilla bittinopeuksilla. Silti tällaisen kuidun käyttäminen on kustannustehokasta korkeintaan silloin, kun kaupunkialueella ei ole valmiiksi asennettua kuitua ja verkkoa rakennettaessa uutta kuitua jouduttaisiin joka tapauksessa vetämään.

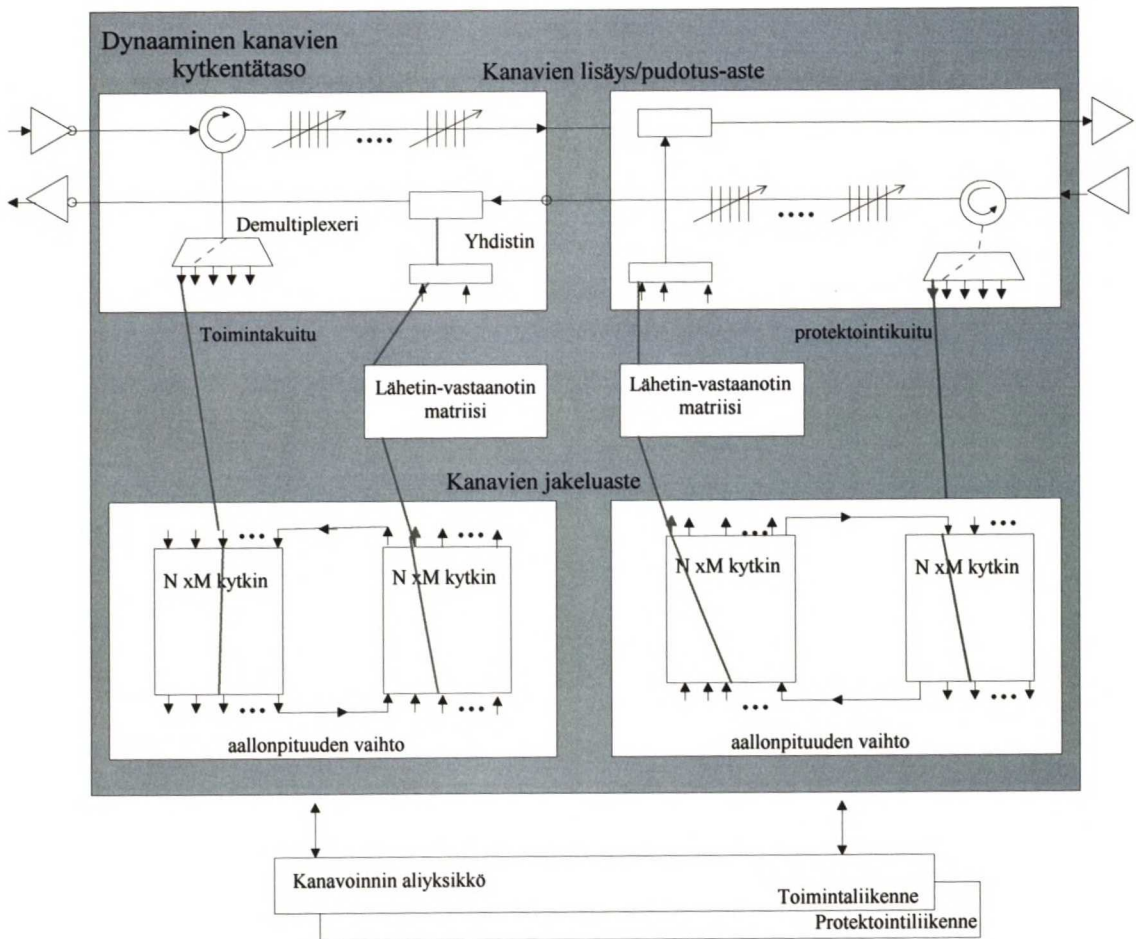


## 5.2 KomNet: Dynaaminen kaupunkialueen DWDM-verkko

KomNet on usean Saksassa toimivan tietoliikenneyhtiön, tutkimuskeskuksen ja yliopiston yhteinen projekti [Lan+02]. KomNet verkon kaupunkiosa sijaitsee Berliinissä. Kaupunkialueen verkko sisältää kaksi yhteenliitettyä eri palvelutoimittajien rengasta, molemmat halkaisijaltaan 60 km. Rengasverkot on liitetty yhteen läpinäkyvästi ja liitosrajapinnassa on käytetty usean eri valmistajan komponentteja. Molemmat rengasverkot sisältävät kolme solmua ja kaksi kuitua, joissa sallitaan sekä yksi- että kaksisuuntainen liikenne (KomNet konsortio suosii kaksisuuntaista liikennettä). Renkaat on lisäksi kytketty läpinäkyvään Stuttgartin ja Frankfurtin väliseen runkoverkkoon.

Demonstroidun kaupunkialueen verkon kapasiteetti on suuri. Yhdessä kuidussa olevien kanavien määrä on 80, kanavaväli on 100 GHz ja jokaisen kanavan siirtonopeus on 10 Gb/s, joten kokonaiskapasiteetiksi saadaan 0,8 Tb/s. Kanavat on jaettu 16 kanavan ryhmiin (CWDM + DWDM) ja pisin linkkipituus on 100 km. Kaupunkialueen KomNet-verkossa siirrettävä liikenne jaetaan dynaamiseen ja staattiseen liikenteeseen. Staattinen liikenne reititetään manuaalisesti kiinteiden aallonpituuksien ja ristikytkimien avulla. Dynaamisen liikenteen reitittämiseen käytetään säädettäviä suodattimia sekä optisia kytkinmatriiseja. Kenttäkokeen yksi tärkeä päämäärä on myös tutkia verkon suojausta, jossa yhdistetään optinen reitti-  
protektointi sekä erilaisia sähköisiä suojausmekanismeja, kuten SONET/SDH-suojaus. Aallonpituuksien sekoittuminen (*wavelength blocking*) estetään siten, että verkossa olevien kanavien aallonpituutta on mahdollista muuttaa.

Kaikki yllämainitut ominaisuudet toteutetaan kuvan 5-2 mukaisen kanavien lisäys/pudotus multiplekserin avulla.



**Kuva 5-2.** KomNet OADM:n toiminnallinen diagrammi. Kuvassa esitetään yhden dynaamisen kanavaryhmän prosessointi. Kuvaan ei ole merkitty staattisen liikenteen kiinteitä suodattimia.

Kaupunkialueen verkon kanavien lisäys/pudotus prosessin hoitaa dynaaminen kanavien kytkentätaso (ks. kuva 5-2), joka koostuu kahdesta asteesta. Ensimmäisessä asteessa DWDM-signaalista suodatetaan pois tiputettavat kanavat sekä siinä renkaaseen lisätään uudet kanavat. Toinen aste on kanavien jakeluaste, joka siirtää tiedon lisättävistä ja tiputettavista kanavista kanavoinnin aliyksikölle.

Kanavien lisäys/pudotus-aste on toteutettu siten, että kuvan 5-2 vasemmanpuoleinen yksikkö hoitaa myötäpäivään kiertävän liikenteen ja oikeanpuoleinen rengasta vastapäivään kiertävän liikenteen. Kaksi suuntaisessa liikenteessä suojaus- ja toimintalinkin välillä ei ole eroa, vaan molemmat kuidut voivat toimia joko suojauslinkkinä tai toimintalinkkinä. Yleensä liikenne reititetään lyhintä mahdollista reittiä, ja siksi kanavien jakeluasteen on tarpeellista lajitella sekä myötä- että vastapäivään kiertävät kanavat toiminta- ja suojausliikenteeseen. Molemmille liikennetyypeille on omat aliyksiköt OADM:ssä.



Lisäyssuunnassa kanavien jakeluaste on yhdistetty kanavien lisäys/pudotus-asteeseen lähetinvastaanotinmatriisin välityksellä. Kanavat lisätään renkaaseen aallonpituudesta riippumattomien yhdistimien avulla. Solmuun saapuvat kanavat voidaan puolestaan dynaamisesti joko pudottaa tai päästää läpi säädettävän Braggin-hilan ja sirkulaattorin avulla. Jos Braggin-hilan resonanssitaajuus on viritetty kanavan keskiaallonpituudelle, tippuu kanava pois. Muutoin kanava ohittaa solmun. Jokainen pudotettava kanava vaatii oman säädettävän suodattimen. Yhden suodattimen vaimennus on luokkaa 0.1 dB, joten 16 suodatinta voidaan kytkeä yhteen ilman merkittävää läpivientivaimennusta. Tiputettavat kanavat heijastetaan sirkulaattorin kautta ja lopullinen kanavien erottelu omiin kuituihin toteutetaan staattisella demultiplekserillä. Demultiplekseri lisäksi poistaa merkittävästi kanavien välistä ylikuulumista [Lei+99].

Kanavien jakeluaste on toteutettu optisten kytkinmatriisien avulla (ks. kuvan 5-2 alaosa). Lisäys- ja pudotussuunnissa käytetään NxM kytkimiä, jotka jakavat erisuunnista tulevan liikenteen toiminta- ja suojausliikenteeseen. Lisäyssuunnassa NxM kytkinmatriisi siirtää lisättävän signaalin lähetin-vastaanottimelle jollain tietyllä vapaalla aallonpituudella. Jakeluaste mahdollistaa lisäksi aallonpituuden muuttamisen. Pudotettavat kanavat voidaan lisätä uudelleen renkaaseen eri aallonpituudella lisäys- ja pudotuskytkinmatriisien välisen linkin välityksellä.

Kanavien lisäys/pudotus-aste on toteutettu myös pelkkien kytkinten avulla, jolloin jokainen kanava (tai kanavaryhmä) vaatii oman kytkimen. Tällöin solmupisteen rakenteesta tulee kuitenkin suhteellisen raskas, eikä verkko ole enää niin skaalattava. Suodattimien ketjuttaminen vaatii esimerkiksi vähemmän kuituliitoksia ja ne ovat helpommin hallittavissa. Viitteessä [Sto+01] on verrattu molempien ratkaisujen fyysisiä siirto-omaisuuksia. Tulos on, että suodatinratkaisussa on hieman suurempi pudotettavan kanavan vaimennus, mutta pienempi läpivientivaimennus. Ylikuuluminen on suurempaa kytkinratkaisussa mutta dispersio puolestaan suurempaa suodatinratkaisussa. Molempien ratkaisujen kytkentä-aika on riittävä ( $< 5$  ms) luotettavan optisen suojauksen ja reitittämisen toteuttamiseksi.

### 5.3 NGI ONRAMP: Seuraavan sukupolven uudelleenjärjestävä WDM-tilaajaverkko

NGI ONRAMP (*next generation internet optical network for regional access using multi-wavelength protocols*) on konsortio, jonka tehtävänä on kehittää protokollia, arkkitehtuureja ja algoritmeja seuraavan sukupolven internetiin [Fro+00]. Konsortion kaupunkialueen koeverkko sisältää sekä syöttö- että jakeluverkon. Syöttöverkko on kaksikuituinen rengas ja se sisältää solmuja, joissa käytetään sekä optisia että sähköisiä komponentteja signaalien reitittämiseen. Molemmissa kuiduissa kulkee normaalitoiminnassa kahdeksan kanavaa (ITU-kanavat 35-42 ja 25-32) 100 GHz:n välein yhteen suuntaan (toisessa myötä- ja toisessa vastapäivään).



Solmupisteiden hallintaosat kommunikoivat molempien kuitujen välityksellä IP-pohjaisen verkon avulla, jossa käytetään aallonpituutta 1510 nm:ä ja Gb-Ethernetiä. Suojaukseen käytetään kuidun katketessa ristikytkimiä, jotka ohjaavat kaikki kanavat yhteen kuituun.

Konsortion päämäärä on tehdä verkosta sellainen, että se mahdollistaa IP-liikenteen siirtämisen suoraan aallonpituuskanavoituna (*IP over WDM*). Jotta verkko olisi IP-ystävällinen, tulee solmupisteiden sallia monipuolisia rajapintoja syöttö- ja jakeluverkon välillä. Solmupisteiden runko on uudelleenjärjestävä OADM, joka reitittää signaalit syöttörenkaan, solmupisteen IP-reitittimen, ja/tai jakeluverkon välillä. OADM sisältää neljä kahdeksan kanavan WDM-multi- ja demultiplekseriä, neljä laajakaistaista multi- ja demultiplekseriä molempien kuitujen kanavaryhmien reitittämiseen sekä matriisin kytkimiä ja vaimentimia. Kanavaryhmien suojauskytkentään käytetään lisäksi laajakaistaista Braggin-hilaa ja sirkulaattoria. Solmupisteen usean gigabitin IP-reitittimessä on kolme säädettävää siirtoporttia. Lisäksi IP-reititin käyttää OADM:n kanssa yhdessä kahta demultiplekseriä ja erbiiumkuituvahvistinta. IP-reitittimen vastaanotinportit ovat kiinteitä ja vastaanotettavien kanavien valitsemiseen käytetään  $1 \times 16$  kytkimiä. Syöttö- ja jakeluverkon rajapintana käytetään multiplekseri–demultiplekseri-paria. Rajapinta on siis täysin optinen ja myös jakeluverkossa käytetään WDM-tekniikkaa. Signaalin vahvistaminen on jakeluverkossa toteutettu etäpumpattujen erbiiumkuituvahvistimien avulla [Dub02].

Kanavien jakamisesta syöttöverkossa ryhmiin, tässä tapauksessa kahteen kahdeksan aallonpituuden ryhmään, käytetään yleisesti nimeä monikaista-arkkitehtuuri. Tämän arkkitehtuurin odotetaan kasvavan samalla kuin verkon kanavien määrä kasvaa, koska se yksinkertaistaa kanavien allokointia [Sal+99], [Kuz+00]. Läpinäkyvyyden johdosta jokaista kanavaa ei tarvitse vastaanottaa kaikissa solmuissa, joten tietty kanavaryhmä voidaan päästää joko solmun läpi tai tiputtaa. Tällöin säästetään solmupisteiden kustannuksissa sekä kanavien kokemat herkkyyshuononukset pienenevät. CWDM tekniikkaa voidaan käyttää myös pienempi kapasiteettisissa kaupunkiverkoissa, esimerkiksi yhdessä lämpötilastabiloimattomien Fabry–Perot-lasereiden ja Gb-Ethernetin kanssa.

Signaalin vahvistamiseen käytetään syöttöverkossa erbiiumkuituvahvistimia. Vahvistimet ovat kaupallisia EDFA:a, jotka sisältävät automaattisen tehontasauksen. Tasaaminen tapahtuu nopealla pumppulaserin säätämällä. Vahvistusepätasapaino puolestaan korjataan säädettävillä vaimentimilla, joita verkon hallintaosa ohjaa.

Edellä suurpiirteisesti kuvatun verkon rakenne on suhteellisen monimutkainen ja myös kallis toteuttaa. Kaikki verkossa käytettävät komponentit ovat kaupallisia ja komponenttien valinnassa on pyritty luonnollisesti siihen, että solmupisteiden aiheuttamat herkkyyshuononukset pysyisivät pieninä. Verkon toiminta on testattu yhdistämällä kaksi solmupistettä kahdella

kuidulla ja siirtämällä solmujen välillä paljon erityyppistä liikennettä. Linkkien pituudet olivat 100 ja 50 km ja käytettävä siirtonopeus 10 Gb/s. Signaali on generoitu ulkoisesti moduloidulla säädettävällä lähettimellä. Bittivirhe on mitattu siten, että signaali lähetetään solmusta yksi, josta se kulkee solmun kaksi läpi takasin solmuun yksi. Solmussa yksi optisesti esivahvistettu signaali vastaanotetaan ja tällöin mitattu herkkyysluonnon bittivirhesuhteella  $10^{-9}$  on noin 2,3 dB. Suurimpia vikälähteitä demonstroinnissa olivat koherentti ylikuuluminen, aallonpituuksien ajelehtiminen, dispersio sekä vahvistimien kohina. Jotta signaali-kohinasuhde pysyisi käyttökelpoisena, on estimoitu, että verkko voidaan laajentaa 20 solmuiseksi.

## 6 Verkkodemonstraatio

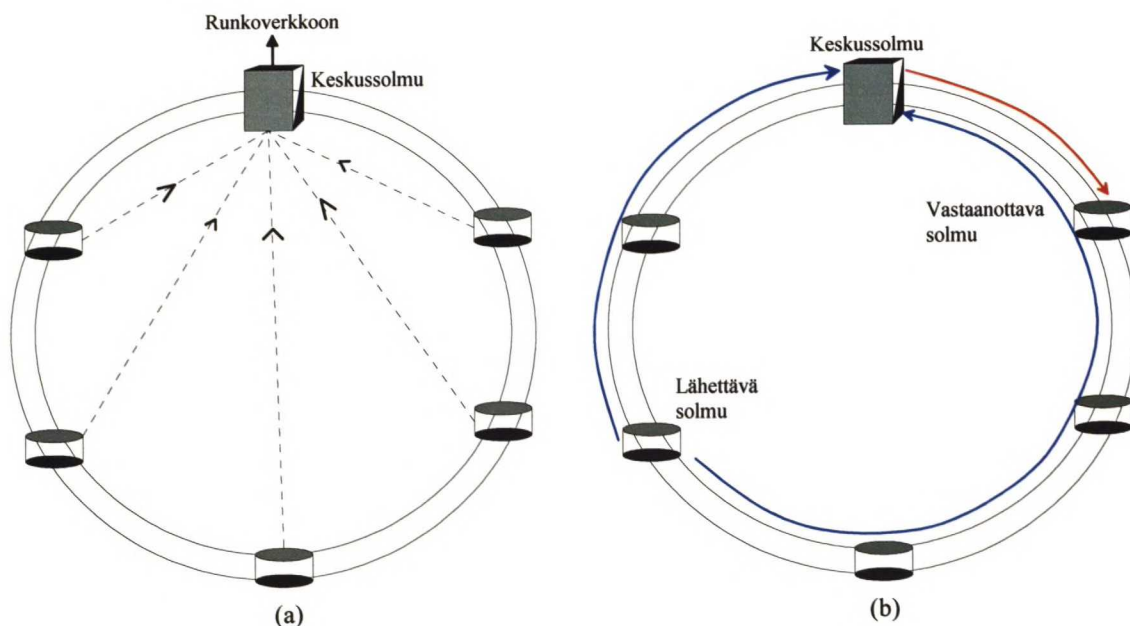
Tässä luvussa esitellään läpinäkyvä kaupunkialueen WDM-syöttöverkko. Verkko on toteutettu osana VTT:n, TKK:n, Tekesin, Elisan ja Nokian tutkimuskeskuksen rahoittamaa OAN-projektia (*optical access network*). Verkon optisen tason on tarkoitus toimia yhdessä VTT-laajakaistaryhmän toteuttaman sähköisen protokollasuunnitelman kanssa. Tässä työssä rakennetaan verkon optinen taso, jonka suorituskykyä tutkitaan mm. bittivirhemittausten avulla. Syöttöverkossa käytetään kahdeksaa aallonpituuskanavaa. Fyysisesti verkko on kaksikuituinen rengas, joissa toisessa liikenne kulkee myötäpäivään ja toisessa vastapäivään. Kanavien lisääminen ja pudottaminen on toteutettu kiinteiden kaistanpäästösuodattimien, multipleksereiden sekä optisten haaroittimien avulla. Verkon hallintaan ei ole varattu erillistä kanavaa, vaan hallintainformaatio on tarkoitus siirtää datan mukana, esimerkiksi SDH-kehiksen sisällä. Verkkoa voidaan lisäksi laajentaa ottamalla käyttöön uusia aallonpituuksia. Verkon laajentaminen on suhteellisen vaivatonta verkkoon asennettujen optisten vuoroerottimien (*interleaver*) ansiosta. Suunnitelmissa laajennettu verkko sisältää sekä dynaamisia että staattisia kanavia. Työssä demonstroidaan verkon staattinen osa, ja selvitetään dynaamisen osan toimintaa.

### 6.1 Verkon rakenne

Kaksisuuntainen rengasverkko voidaan suunnitella joustavaksi siten, että verkon jokainen solmu voi lähettää datansa milloin tahansa mihin solmuun tahansa (*multiple-access*). Jos renkaan jokainen solmu voi vastaanottaa jokaisen verkossa liikkuvan kanavan, on verkko sekä fyysisesti että loogisesti rengas. Tällaisen verkon toteuttaminen on kuitenkin kallista, koska tällöin tarvitaan mm. aallonpituusmuuntimia. Edullisempi vaihtoehto on verkko, joka on fyysisesti rengas mutta loogisesti tähti (*hubbed ring*). Tällöin rengasverkon jokaisen solmun lähettämät kanavat vastaanotetaan yhdessä keskussolmussa ja vain keskussolmun lähettämät kanavat voidaan pudottaa rengaslinkeillä sijaitsevista linjaterminalleissa (ks. kuva 6-1). Koeverkon rakenne on juuri tällainen. Ratkaisu palvelee hyvin kaupunkialuetta, koska yleensä liikenne ei ole kaupungin sisäistä vaan valtaosa liikenteestä on tarkoitettu kulkemaan esimerkiksi syöttöverkon keskussolmuun liitettyyn runkoverkkoon. Jos liikenne on kaupungin sisäistä,



esimerkiksi kahden samassa kaupungissa sijaitsevan yrityksen välistä tiedonsiirtoa, kulkee data ensin keskussolmuun josta se lähetetään edelleen eri aallonpituudella oikeaan määränpäähän. Kuvassa 6-1 b lähettävä solmu lähettää datan eri kuitujen kautta molempiin suuntiin rengasta. Linkillä olevat solmupisteet eivät pudota signaalia pois ennen kuin se on saapunut keskussolmuun. Keskussolmussa optinen ristikytkin on asetettu kuuntelemaan lyhyempää reittiä. Jos signaalintaso on jostain syystä liian alhainen, siirrytään kuuntelemaan toista kuitua, jossa kulkee siis sama liikenne (optinen (1+1)-suojaus). (1+1)-suojaus toimii varotoimenpiteenä jos toimintalinkki syystä tai toisesta katkeaa, sekä lisäksi se mahdollistaa verkon päivittämisen siten, että koko verkkoa ei tarvitse ajaa alas (*on-the-fly upgrades*).



**Kuva 6-1. a) Rengasverkko, joka on loogisesti tähti. b) Liikenteen kulku renkaan linjasolmujen välillä.**

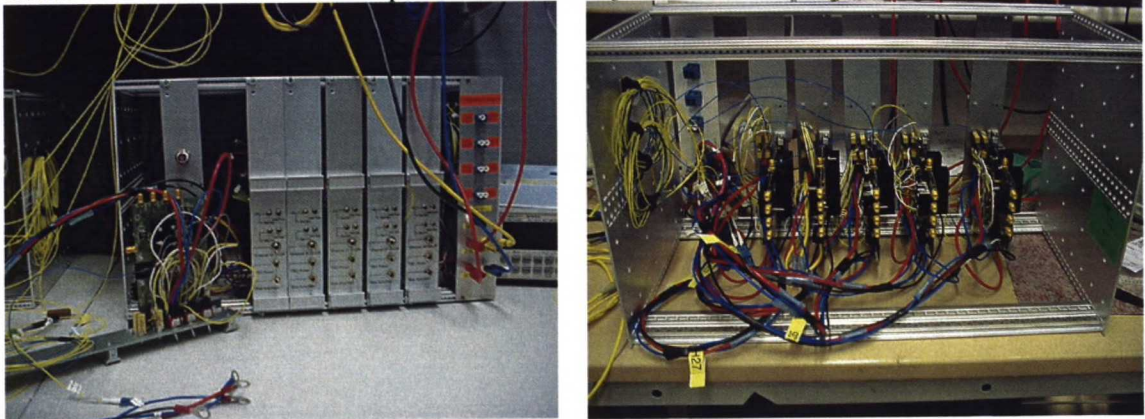
### 6.1.1 Lähetinkortit

Koeverkon lähetinpää koostuu yhteen kehikkoon asetetuista kahdeksasta lähetinkortista (ks. kuva 6-2). Lähettimistä seitsemän on suoramoduloituja DFB-lasereita (Agere D2570) ja yksi elektroabsorptio-laser (Alcatel 1916 LMM). Lasereiden ohjaukseen käytetään GIGA:n 2.5 gigabitin laserajurikortteja (GD90578). Korteista löydettiin useita suunnitteluvirheitä ja ajurikortteihin on jouduttu tekemään komponenttimuutoksia oikeiden jännite- ja virtatasojen aikaansaamiseksi. Lähetin korttien virittäminen ja testaaminen olikin työn aikaavievän osa.

Lähetinkortit sisältävät sähköisen sisäänmenon kellolle ja datalle (sekä invertoidulle kellolle ja datalle) sekä sähköisen ulostulon modulointisignaalin tarkkailuun. Lasereiden modulointi-



syvyyttä, esijännitetasoa sekä lämpötilan kontrollointiin käytettävän TEC-piirin virtaa voidaan säätää manuaalisesti kehikon etupaneeliin asennettujen säädettävien vastusten avulla.



Kuva 6-2. Koeverkon lähettimet

Laserajurikorttien TEC-piirin avulla laserin lämpötilaa voidaan pienentää mutta ei kasvattaa. Tämän johdosta lasereita pyritään ajamaan virralla, joka pitää laserin niin kuumana, että TEC-piiri imee koko ajan hiukan virtaa. Tällä tavoin taataan se, että lähtetimen keskiaallonpituus ei pääse ajelehtimaan halutun aallonpituuskaistan ulkopuolelle. Tässä työssä laserin lämpötila ei ole kuitenkaan laboratorio-olosuhteissa ongelma, sillä laserit vaativat huoneenlämpötilassa aina jäähdytystä. Tämä johtuu siitä, että suoramoduloiduista DFB-lasereista haluttu ulostuloteho on 10 dBm ja tällöin lasereita täytyy ajaa suhteellisen suurella virralla (~3 A). Taulukossa 3 on esitetty koeverkossa käytettävien kanavien keskiaallonpituudet.

Taulukko 3. Parittomien ITU-kanavien 25-39 keskiaallonpituudet.

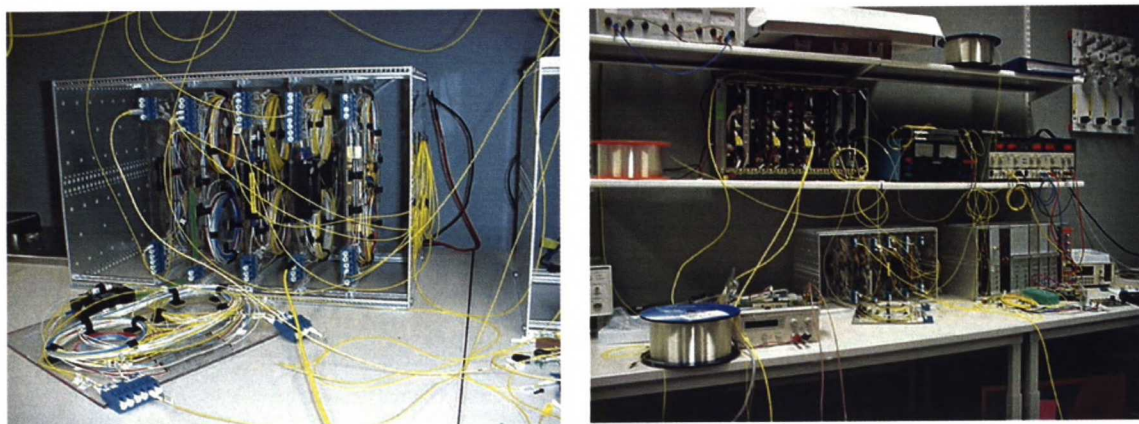
Kanava	Taajuus (THz)	Keskiaallonpituus (nm)
25	193,700	1547,72
27	193,500	1549,32
29	193,300	1550,92
31	193,100	1552,52
33	192,900	1554,13
35	192,700	1555,75
37	192,500	1557,36
39	192,300	1558,98

### 6.1.2 Linjaterminaalit

Solmupisteiden passiivinen optiikka on kasattu korteille, jotka on asetettu lähettimien tapaan yhteen kehikkoon (kuva 6-3). Kasaamiseen on käytetty Ericssonin kuituhitsauslaitetta (FSU 975) ja tyypillisesti hitsauksesta aiheutuva vaimennus oli 0,01-0,05 dB. Kuituliitokset on päällystetty UV-kovetteisesta akrylaatista tehdyllä vaipalla. Komponenttien kuidut on kierrytetty kerille, jotka on kiinnitetty korteille ja liittimet on yhdistetty korttien etureunaan kiinnitettyihin

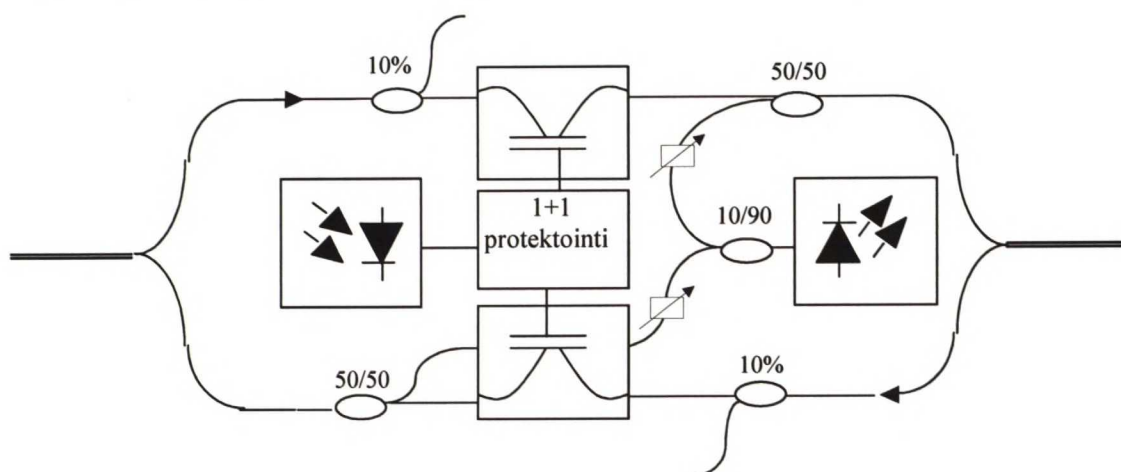
LC-kuituadaptoreihin. LC on pienikokoinen pikaliitos, jonka aiheuttamat kytkemisvaimennukset ovat pieniä (tyypillisesti 0,1 dB) ja jossa on lukitussalpa tahattoman irrottamisen estämiseksi.

Linjaterminaalit yksi ja kaksi ovat fyysisesti rakenteeltaan samanlaisia (signaalin haaroitussuhteita lukuun ottamatta). Loogisesti solmut eroavat siten, että solmuissa pudotetaan ja lisätään eri kanavat. Tämä on luonnollista, koska solmut jakavat saman linkin, ja jos kanavien aallonpituudet olisivat samat, ei aallonpituusreititysheito toteutuisi. Solmussa yksi verkkoon lisätään haaroittimen kautta kanava 31 ja vastaanotetaan kanava 39. Solmussa kaksi verkkoon lisätään vastaavasti kanava 29 ja vastaanotetaan kanava 37.



**Kuva 6-3.** Vasemmassa kuvassa on solmupisteiden optiikka, lukuunottamatta vaimentimia, vahvistimia ja multipleksereitä. Loput optiikasta on sijoitettu oikeanpuoleisessa kuvassa hyllyllä olevaan kehikkoon.

Linjaterminaalien yksi ja kaksi rakenne on kuvassa 6-4. Vastaanotinpuolella on  $2 \times 1$  suojauskytkin, jolla valitaan kumpaan suuntaan kiertävää liikennettä kuunnellaan.

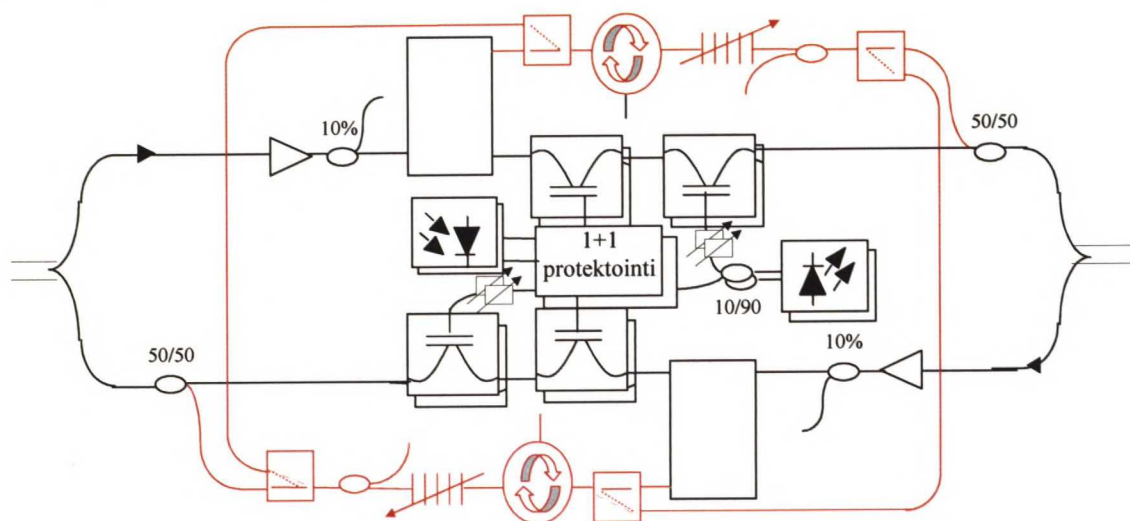


**Kuva 6-4.** Linjaterminaalien yksi ja kaksi rakenne.



Kuvassa 6-4 signaali lähetetään 10/90 haaroittimen kautta. Tilanne vastaa linjaterminaalia yksi. Linjaterminaalissa 2 lähetyksen jakamiseen myötä- ja vastapäivään käytetään 50/50 haaroitinta. Toisaalta linjaterminaalissa yksi vastapäivään lähetettävä kanava lisätään renkaaseen kuvasta 6-4 poiketen 10/90-haaroittimen kautta. Tällä tavoin solmun läpivientivaimennus vastapäivään kiertävälle liikenteelle saadaan pienemmäksi. Kuvassa 6-4 näkyviä 10% haaroittimia käytetään sekä myötä- että vastapäivään kiertävien signaalien tehotasojen ja aallonpituuksien tarkkailuun. Lähetyspään haaroittimen jälkeen signaalin tehotaso asetetaan sopivaksi säädettävällä vaimentimella.

Solmupisteessä 3 (kuva 6-5) verkkoon lisätään  $1 \times 2$  multiplekserin kautta kaksi kanavaa (kanavat 27 ja 25) sekä siellä myös vastaanotetaan vastaavasti kaksi kanavaa (kanavat 33 ja 35). Solmupisteessä 3 kanavien jakoon käytetään optisia vuoroerottimia. Vuoroerottimien avulla siirtolinkillä kulkeva 100 GHz:n kanavaväli saadaan solmupisteessä kasvatettua 200 GHz:iin. Tällöin solmupisteessä voidaan käyttää edullisempia komponentteja sekä esimerkiksi kanavien välinen ylikuuluminen on paremmin hallittavissa.



**Kuva 6-5.** Linjaterminaali 3. Dynaaminen osa solmusta on piirretty kuvaan punaisella.

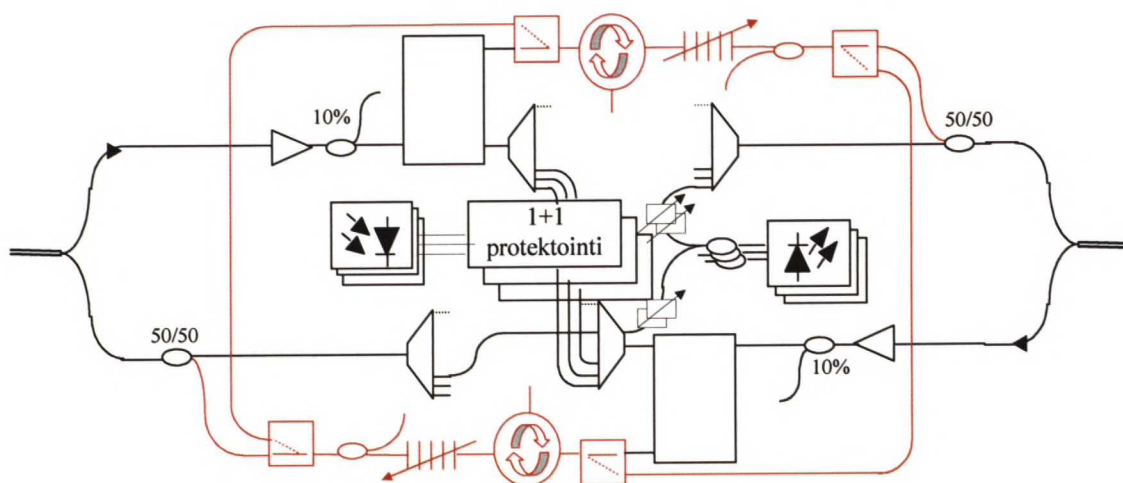
Linjaterminaaliin kolme on lisätty kaksi erbiumpuutuvahvistinta. Vahvistimet toimivat sekä esivahvistemena linjaterminaalissa kolme vastaanotettaville kanaville sekä toisaalta linjavahvistimina muille kanaville.

### 6.1.3 Keskitin

Keskussolmussa on mahdollisuus vastaanottaa jokainen verkossa liikennöivä kanava. Sekä myötä- että vastapäivään kulkevien kanavien erotteluun käytetään demultipleksereitä, ja keskus-solmussa verkkoon lisättävät kanavat johdetaan renkaaseen multiplekserin avulla (8 kanavainen

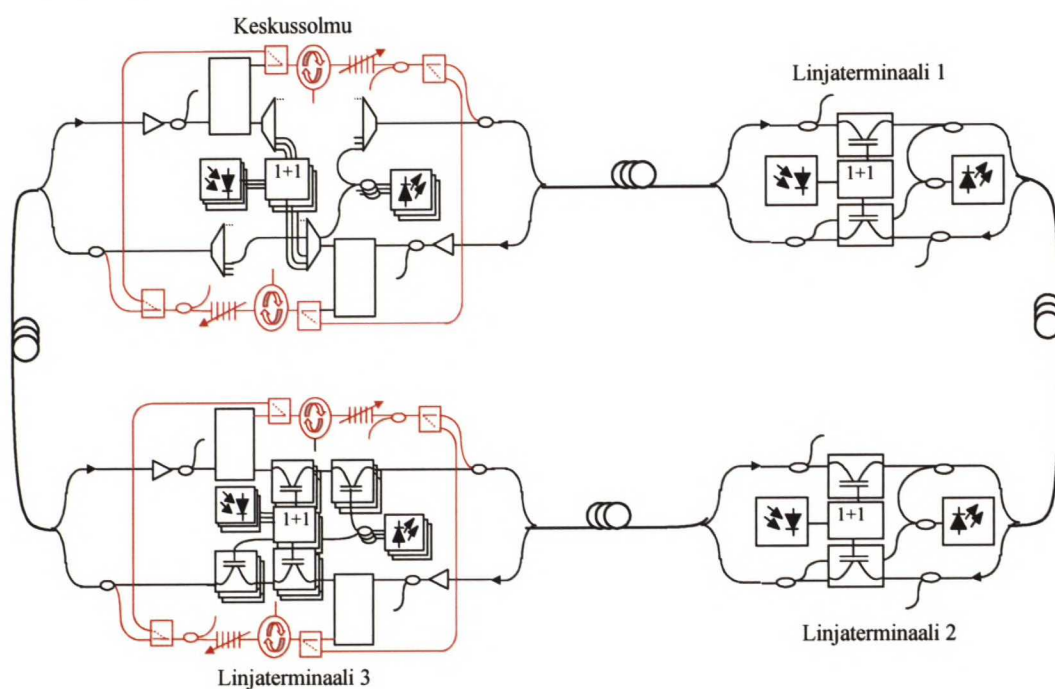


multi/demultiplexeri 200 GHz:n kanavavälillä, JDS Uniphase). Keskussolmun rakenne on esitetty kuvassa 6-6.

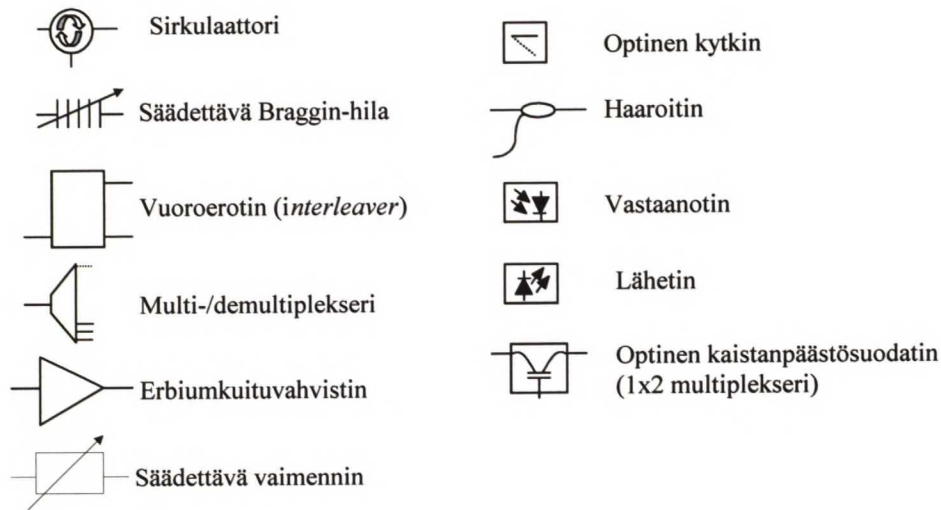


Kuva 6-6. Keskussolmu.

Keskussolmussa verkkoon lisätään siis kanavat, jotka pudotetaan linjaterminaaleissa. Lähetinpään haaroittimien haaroitussuhde riippuu siitä, mihin solmuun signaali on tarkoitus lähettää. (10/90 haaroitin solmuihin 1 ja 3 lähetettävälle liikenteelle ja 50/50 haaroitin solmuun 2 lähetettävälle liikenteelle). Koeverkon koko rakenne on esitetty kuvassa 6-7 ja rakennekuvissa käytetyt piirrosmerkit on selitetty kuvassa 6-8.



Kuva 6-7. Koeverkon rakenne



**Kuva 6-8.** Verkon rakennekuissa käytetyt piirrosmerkit.

#### 6.1.4 Verkon dynaaminen laajennus

Verkko sisältää siis option verkon kapasiteetin dynaamiseen kasvattamisen. Dynaamisilla aallonpituuksilla voi kukin verkon solmupiste ottaa yhteyden haluamaansa toiseen solmuun säätämällä lähettimensä aallonpituutta. Tällöin verkko on sekä fyysisesti että loogisesti rengas ja verkon kapasiteetin lisääminen on vaivatonta. Aallonpituuden säätäminen voidaan toteuttaa joko nopealla säädettävällä laserilla tai DFB-laserin lämpötilan avulla. Tällöin vastaanottavassa solmussa pitää olla vastaavasti säädettävä suodatin. Dynaamisessa osassa kanavien lisäämiseen ja pudottamiseen käytetään sirkulaattorin ja säädettävän Braggin-hilan muodostamaa OADM:ä.

Dynaamisien aallonpituuksien suojaaminen on monimutkaisempaa kuin staattisten, sillä vian sattuessa joudutaan signaali reitittämään uudelleen joko lähettävässä solmussa tai viallisen kohdan molemmiin puolin (*wrap-around*). Tähän tarkoitukseen dynaaminen osa sisältää 2x2-suojauskytkimiä (ks. kuva 6-7). Laajennettu verkko sisältää siis kaksi eri suojausmekanismia: staattisen kapasiteetin (1+1)-suojauksen ja dynaamisen kapasiteetin silmukkasuojauksen (*loopback protection*).

Dynaamiset kanavat on tarkoitus lisätä parillisille kanaville (esim. 26, 28,...,40), joihin päästään käsiksi vuoroerottimien avulla. Kanavin lisäämisen pitää lisäksi järjestää siten, etteivät lisättävät kanavat mene päällekkäin jo verkossa olevien kanavien kanssa. Tähän tarkoitukseen täytyy suunnitella sähköinen protokolla, joka huolehtii signaalin reitityksestä ja pitää kirjaa verkossa liikkuvista kanavista. Kun parilliset kanavat on otettu käyttöön, on linkeillä 100 GHz:n kanavaväli, mutta keskussolmussa ja linjaterminaalissa kolme kanavaväli on edelleen 200

GHz:ä. Tulevaisuudessa myös linjaterminaalien yksi ja kaksi rakenne on tarkoitus muuttaa vastaavaksi kuin linjaterminaalin kolme rakenne.

Jos verkkoa laajennetaan linjaterminaaleja lisäämällä, tulee verkkoon asentaa mahdollisesti lisää vahvistimia. Vahvistimien lisääminen täytyy suunnitella siten, että esimerkiksi ASE-kohina ei muodostu verkon skaalattavuuden esteeksi. On kuitenkin arvioitu, että verkkoon voidaan lisätä esimerkiksi kymmenen 4-5 dB:n kohinaluvun omaavaa erbiumkuituvahvistinta ilman merkittävää suorituskyvyn tippumista. Kymmenen vahvistimen avulla verkko voidaan maantieteellisesti laajentaa viisinkertaiseksi demonstroitavaan verkkoon nähden. Tällöin syöttörenkaan kehän pituus voisi olla yli 200 km.

## 6.2 Mittaukset ja tulokset

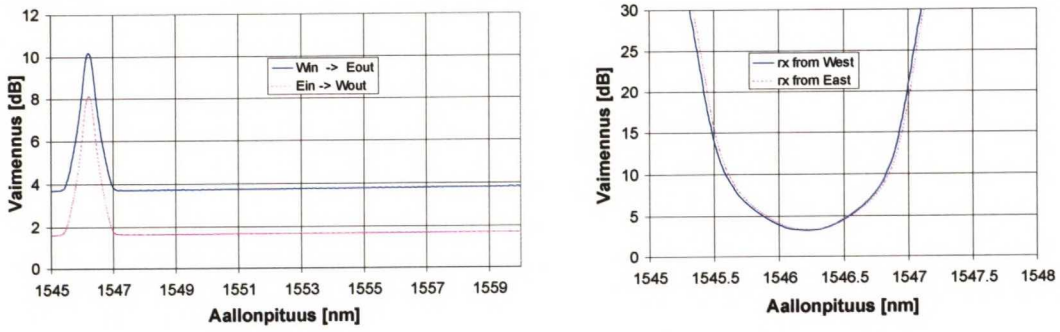
Optisen tason toiminta on testattu vaimennus-, silmäkuvio- ja herkkyyshuononnusmittausten avulla. Mittauksissa solmujen välisten linkkien pituudet olivat 12,5 km (eli renkaan kehän pituus on 50 km) ja käytetty kuitu saatiin tutkimuskäyttöön NK Cables Oy:ltä. Käytettävä kuitu on standardiyksimuotokuitua, jonka vaimennus aallonpituudella 1550 nm on 0,2 dB/km.

Jokainen verkon solmupiste sisältää LC-kuituadaptoreita, joista voidaan tarkkailla verkon toimintaa halutussa mittapisteessä. Tässä työssä silmäkuvion tarkkailuun käytetään fotodetektoria (HP 83440C) ja nopeaa digitaalioskilloskooppia (HP 54750A). Bittivirhesuhde mitataan bittivirhetesterillä (Anritsu MP1632A). Bittivirhetesteriä käytetään myös 2,5 Gb/s pseudosatunnaisen modulointisignaalin muodostamiseen. Bittivirheestä suuntaa-antava parametri, tavuvirhe, mitataan erillisellä SONET-I/O-kortilla

### 6.2.1 Vaimennusmittaukset

Solmupisteiden vaimennusmittauksiin on käytetty laajakaistaista valonlähdettä (HP 83437A) ja spektrianalysaattoria (Ando AQ-6315A). Solmupisteiden mitatut vaimennukset vastaavat hyvin tehobudjettilaskelmia (Liite A), jotka perustuvat komponenttivalmistajien tuoteselosteisiin. Kuvassa 6-9 on esitetty linjaterminaalin yksi läpivienti- ja tiputusvaimennukset. Kuvasta nähdään, että linjaterminaali yhden heijastuskanavan vaimennus vastapäivään kiertävälle signaalille on noin 1,8 dB:ä ja myötäpäivään kiertävälle signaalille noin 3,8 dB:ä. Kahden desibelin ero johtuu siitä, että linjaterminaalissa kanava 39 lisätään myötäpäivään 50/50-haaroittimen avulla ja vastapäivään puolestaan 10/90-haaroittimen avulla. Linjaterminaali kahden läpivienti- ja tiputusvaimennukset vastaavat linjaterminaalin yhden vaimennuksia. Linjaterminaali kolmen läpivientivaimennus on rengasta molempiin suuntaan kiertävälle signaalille noin 7,5 dB:ä ja tiputusvaimennukset kanaville 33 ja 35 luokkaa 5 dB:ä. Keskussolmun tiputusvaimennukset kaikille kanaville on noin 8 dB:ä.





**Kuva 6-9. (a) Linjaterminaali yhden läpivientivaimennukset (b) Linjaterminaalissa yksi vastaanotettavan kanavan 39 tiputusvaimennukset.**

### 6.2.2 Silmäkuviomittaukset

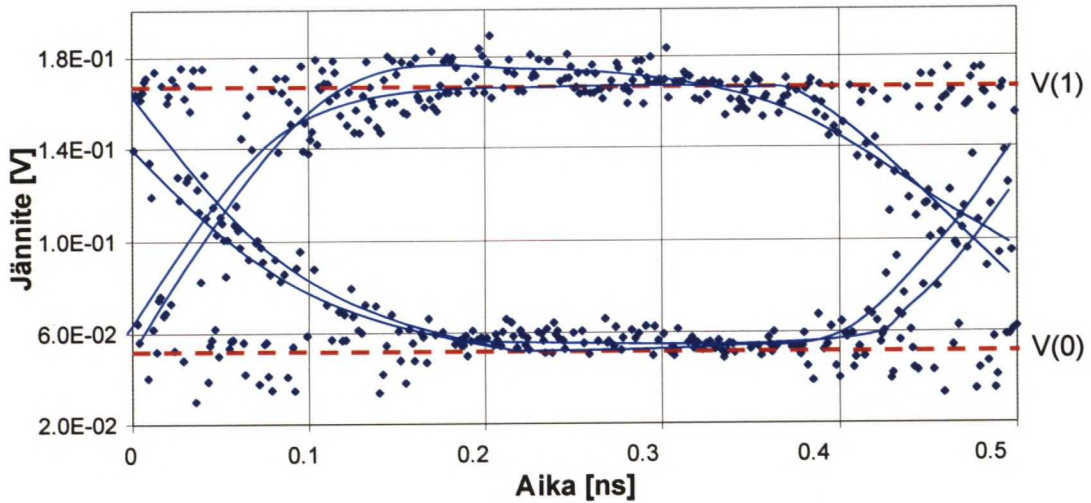
Silmäkuvioita (*eye diagram*) voidaan käyttää signaalin laadun mittaamiseen siirtolinjalla. Silmäkuvio saadaan muodostettua lähettämällä siirtolinjalle pseudosatunnaisena signaalina NRZ-dataa ja liipaisemalla kellosignaaliin, jolla NRZ-data on generoitu. Tällöin oskilloskoopin kuvaruudulle muodostuva kuva on kuvan 6-10 mukainen. Kuvassa näkyy useita NRZ-datan tilanvaihtoja päällekkäin ja yhdessä nämä aaltomuodot muodostavat silmäkuvion. Mitä avoimempi silmä on, sitä parempi on signaalin laatu.

Silmäkuviomittauksilla havaitaan myös systeemin synkronointivirhe (*timing jitter*). Kuvasta 6-10 tämä nähdään siten, että synkronointivirheen johdosta NRZ-datan tilanvaihdot eivät tapahdu joka pyyhkäisyllä samaan aikaan ja signaali muodostaa oskilloskoopin näytölle vierekkäisiä polkuja. Synkronointivirheen minimoimiseksi vastaanottimen kynnystaso tulee asettaa kuvan 6-10 nousevien ja laskevien reunojen leikkauskohtaan. Silmäkuvioista voidaan laskea signaalin laatua kuvaava parametri, sammutussuhde, yhtälöllä

$$r_{ex} = 20 \cdot \log \frac{V(1) - V_k}{V(0) - V_k} [\text{dB}] \quad (6.1)$$

missä  $V(1)$  on looginen ykköstaso,  $V(0)$  looginen nollataso ja  $V_k$  vastaanottimen pimeävirran aiheuttama jännite. Pienillä sammutussuhteilla (silmän aukeamilla) pienikin lähettimen tai vastaanottimen synkronointivirhe, tai väärin kohdistettu vastaanottimen kynnystaso, aiheuttaa hyvin suuren bittivirhesuhteen.

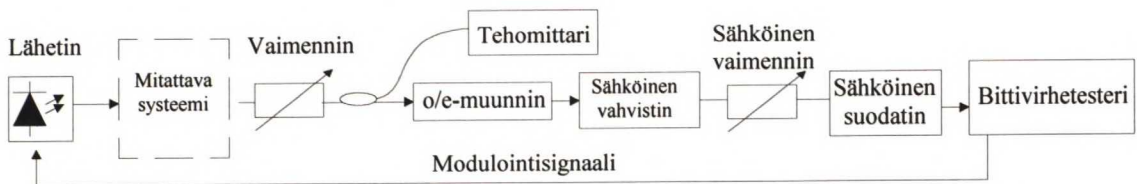
Kuvassa 6-10 on keskussolmusta lisättävän kanavan 37 mitattu silmäkuvio, kun kanava kiertää vastapäivään ja se vastaanotetaan linjaterminaalissa kaksi.



Kuva 6-10. Silmäkuvio.

### 6.2.3 Bittivirhemittaukset

Bittivirhesuhde on yleinen ja hyvä tapa esittää verkon suorituskyky. Yleensä bittivirhesuhde esitetään vastaanotetun tehon funktiona, jolloin lähetysteho voidaan pitää vakiona ja vastaanotettavaa tehoa säädetään vastaanottimen eteen asetetun vaimentimen avulla (kuva 6-11). Referenssimittauksessa (*Back-to-back*) mitattavan systeemin paikalle asetetaan tyhjä kuitu. Referenssimittaus toimii vertailutuloksena ja mitattavan linkin herkkyyshuononnus saadaan referenssibittivirhesuhteen ja linkin bittivirhesuhteen erotuksena.



Kuva 6-11. Mittauskytkentä bittivirhesuhteen määrittämiseen.

Tässä työssä kanavien bittivirhesuhteet on tarkistettu kuvan 6-11 esittämällä tavalla ja kanavien toiminnot on todettu virheettömiksi. Herkkyyshuononnusten laskemiseksi on kuitenkin jouduttu käyttämään erilaista mittauskytkentää. Tämä johtuu siitä, että bittivirhe alkaa kasvaa vasta pienillä tehotasoilla ( $\sim -14$  dB) ja tällöin mittauksissa käytetyn o/e-muuntimen ulostulojännite käy liian pieneksi bittivirhetesterille. Vastaanottimien herkkyys kyllä riittää paljon pienempienkin signaalien vastaanottamiseen, sillä käytettävän PIN-vastaanottimen herkkyys on luokkaa  $-20$  dBm 2.5 Gb/s bittinopeudella. Toisaalta jännite voidaan kasvattaa sähköisellä vahvistimella,

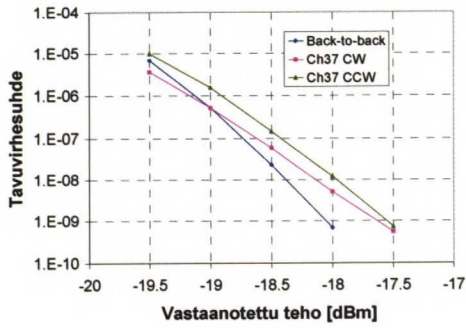
mutta tällöin valotehon synnyttämä jännite hukkuu käytettävän vahvistimen kohinaan. Toinen ratkaisu olisi käyttää jokaiselle kanavalle optista esivahvistusta, jolloin päästäisiin mittaamaan hyvin pieniä vastaanottotehoja ( $\sim -40$  dBm). Tämä ratkaisu on kuitenkin käytännössä kustannusten johdosta huono. Kustannustekijät eivät välttämättä puolla myöskään vyörypurkausdetektorin käyttämistä, jolla voitaisiin vastaanottaa signaaleja noin  $-35$  dBm:iin asti.

Herkkyyshuononnusten laskemiseen on käytetty SONET-I/O-korttia, josta saadaan ulos systeemin tavuvirhesuhde. Tavuvirhesuhde vastaa pienillä virhesuhteilla hyvin bittivirhesuhdetta, mutta suurilla virhesuhteilla todennäköisyys, että yhdessä tavussa on useampia bittivirheitä, kasvaa. Tavuvirhemittauksissa tämä näkyy käyrien loivenemisena suurilla virhesuhteilla.

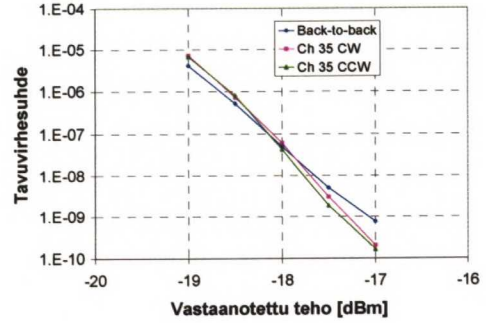
SONET-I/O-kortti (PMC5381 Sierra) syöttää laserajureille SONET-kehystä, jonka hyötykuormaksi on lisätty pitkä ( $2^{31}+2^{18}+1$  bittiä) pseudosatunnaissignaali. I/O-kortti sisältää myös optisen lähtin/vastaanottimen, joka on tarkoitettu ensisijaisesti  $1,31\text{ }\mu\text{m}$ :n alueelle, mutta vastaanotinta voidaan käyttää myös  $1,55\text{ }\mu\text{m}$ :n signaalien vastaanottamiseen. Kortin SONET-piirillä on rekistereitä, joita päästään lukemaan ja kirjoittamaan tietokoneella. Rekisterien lukuohjelma on kirjoitettu C-kielellä ja lukuun käytetään standarisarjaväylää (RS-232). Piiri tarjoaa siis bittivirheen sijaan pelkästään signaalin tavuvirhesuhteen, joka luetaan suoraan SONET-kehyksistä. Tavuvirheet saadaan laskurilta, joka luetaan joka sekunti ja jonka jälkeen se nollataan. Mittausaika (keskiarvoistusaika) saadaan puolestaan piirin reaaliaikaiselta kellolta.



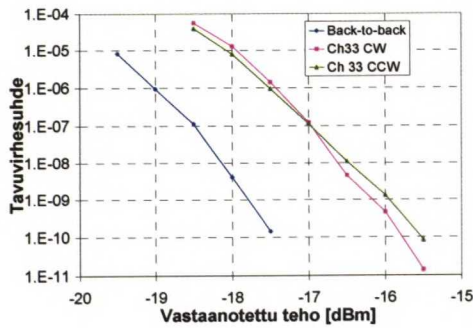
Kanavien mitatut herkkyyshuononnukset on esitetty kuvassa 6-12.



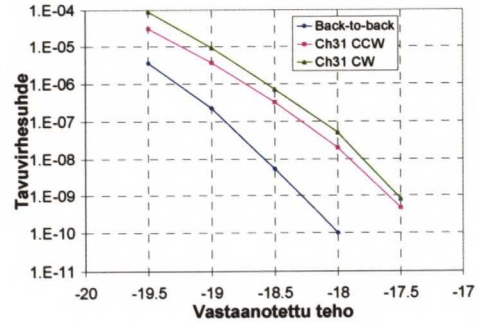
(a)



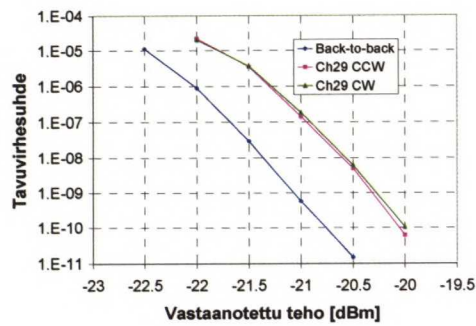
(b)



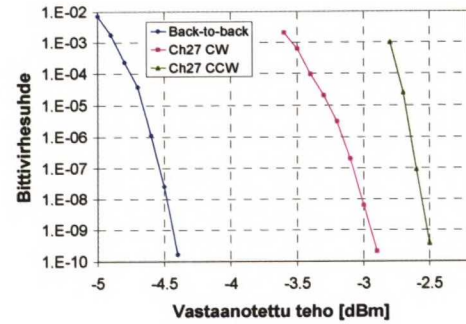
(c)



(d)



(e)



(f)

**Kuva 6-12.** Kanavien mitattuja herkkyyshuononnuksia. CW tarkoittaa myötäpäivään kiertävää liikennettä ja CCW vastapäivään kiertävää liikennettä.

Kuvassa 6-12 (e) kanavan 27 herkkyyshuononnus on mitattu kuvan 6-11 mukaisella kytkennällä. Kanavan bittivirhe kasvaa nopeasti jo -4 dBm:n vastaanottoteholla, sillä mittauksessa on käytetty pientä sammutussuhdetta (3.7 dB). Pieni sammutussuhde johtuu puolestaan

siitä, että lähetin on biasoitu hyvin korkealle, jotta o/e-muuntimella saataisiin tarpeeksi suuri ulostulojännite.

Kanavien referenssimittauksista näkyy (kuvat 6-12 (a)–(f)), että vastaanotettu teho  $10^{-9}$  tavuvirheen saavuttamiseksi vaihtelee kanavasta riippuen -21.1 dBm:n ja -17.1 dBm:n välillä. Näin suuri ero johtuu siitä, että lähettimien ajurikortit eivät ole identtisiä ja mittauksissa on jouduttua käyttämään erilaisia lähettimien sammutussuhteita ja lähetystehoja. Sammutussuhteen  $r_{ex}$  aiheuttama herkkyysluonnon PIN-detektorille on [Hii98]

$$p_p = 10 \log \frac{r_{ex} + 1}{r_{ex} - 1}. \quad (6.2)$$

Kaavasta 6.2 voidaan laskea, että esimerkiksi sammutussuhteella 10 dB herkkyysluonnon on 0,87 dB ja sammutussuhteella 6 dB jo 1,5 dB:ä. Erot lähettimien sammutussuhteissa johtavat myös siihen, että lähettimien viserrykset poikkeavat toisistaan ja ne aiheuttavat erisuuruisia herkkyysluonnonuksia. Viserryksen aiheuttama herkkyysluonnon on [Agr97]

$$p_p = -10 \log(1 - 4BLD\Delta\lambda_c), \quad (6.3)$$

missä  $\Delta\lambda_c$  on viserryksen aiheuttama taajuussiirtymä.

Sen sijaan myötä- ja vastapäivään kiertävän kanavan välinen herkkyysluonnon ero on kuvan 6-12 mukaan hyvin pientä. Kaikkien linkkien pituus oli 12,5 km, eli pisimmillään kanavien välillä on 37,5 km matkaero. Dispersion aiheuttama herkkyysluonnon on

$$P_p = -5 \log(1 - (4BLD\sigma_\lambda)^2), \quad (6.4)$$

missä  $\sigma_\lambda$  on Gaussiseksi oletetun pulssin leveys. Yhtälön 6.4 mukaan 37.5 km matkaero ei aiheuta standardiyksimuotokuidussa ( $D \approx 17$  ps/nm-km) DFB-lasereiden ja 2,5 Gb/s siirtonopeuden kanssa merkittävää herkkyysluonnonusta.

Muut mahdolliset lähteet herkkyysluonnonuksille ovat verkossa käytettävät vahvistimet ja vastaanottimen kohina. Mittauksissa käytetyn vahvistimen piensignaali vahvistus oli 25 dB ja kohinaluku 5 dB. Mittauksissa signaali-kohinasuhde oli yli 20 dB, jolloin myöskään ASE-kohina ei aiheuta merkittävää herkkyysluonnonusta [Hii98]. PIN-detektorin aiheuttama herkkyysluonnon sammutussuhteella 5 – 10 dB on noin 2,3 – 0,3 dB.

## 7 Yhteenveto

Tässä työssä on rakennettu ja testattu kaupunkialueen WDM-syöttöverkon optinen taso. Koeverkko on kaksikuituinen, reittiprotektoitu rengas, jossa käytetään kahdeksaa staattista aallonpituuskanavaa. Työ on tehty osana OAN-projektia VTT Mikroelektroniikkakeskuksessa. Koeverkko on toiminnallisesti yksinkertainen ja sen rakenne mahdollistaa verkon vaivattoman skaalattavuuden. Jos ja kun kaupunkialueelle on asennettu valmista kuitua, voidaan verkon kapasiteettiä kasvattaa huomattavasti WDM-tekniikan avulla päivittämällä pelkästään solmupisteitä. Koeverkon kustannustehokkuus takaa sen, että systeemien päivittäminen voidaan aloittaa pienillä alkuinvestoinneilla. Kapasiteettitarpeen kasvaessa operaattoreilla on mahdollisuus lisätä kapasiteettiä nopeasti, ilman että verkon muut toiminnot kärsivät.

Verkon suorituskykyä on testattu herkkyyshuononnus- ja silmäkuviomittausten avulla. Demonstroinnissa käytetyllä 2,5 Gb/s siirtonopeudella suurin syy herkkyyshuononnuksiin oli lähettimien epästabiilius. DFB-laserien ohjaukseen käytetyissä korteissa havaittiin useita suunnitteluvirheitä, jonka johdosta lähtimet toimivat yksilöinä, hieman eri suorituskyvyillä. Korteihin jouduttiin tekemään komponenttimuutoksia, jotta lähtetimistä saatiin haluttu ulostuloteho ja sammutussuhde. 8-10 desibelin sammutussuhde saatiin aikaan vain siten, että laserin esijännite tiputettiin hyvin lähellä laseroinnin kynnystasoa, jolloin puolestaan viserrys kasvoi merkittävästi. Suuri virhe laserajurikortilla oli myös se, että laserin ohjaukseen tarkoitettu piiri sijaitsi kortilla 2,5 cm:n päässä laserin jaloista. Tämä aiheuttaa sen, että ohjauspiirin ja laserin väliset heijastukset huonontavat lähtimen ulostulospektriä. Huononnus nähtiin silmäkuviomittauksissa siten, että silmäkuvion nousevilla reunoilla tapahtui oskillointia. Oskillointia saatiin pienennettyä kytkemällä laserin rinnalle vastus, joka puolestaan vaikutti laserin muihin ominaisuuksiin.

Tulevaisuudessa verkkoa on tarkoitus laajentaa ottamalla käyttöön dynaaminen osa, jossa käytetään säädettäviä lähtimiä ja vastaanottimia. Laajennetussa verkossa verkon hallinnan ja suojauksen merkitys korostuu, sillä verkon tulee sisältää protokolla, joka estää mm. kanavien sekoittumisen.

Myös verkon vahvistin suunnittelu ja vahvistimien sijoittelu kaipaavat jatkotutkimuksia, etenkin jos verkkoa laajennetaan solmupisteitä lisäämällä. Verkon hintaa saadaan oleellisesti pienennettyä, jos WDM-signaalien vahvistus voidaan toteuttaa esimerkiksi erbiumpuuvahvistimilla, jotka käyttävät yhteisiä pumppulasereita. Myös muiden vahvistimien käyttöä on syytä tutkia. Kokeilemisen arvoisia skeemoja voisi olla esimerkiksi kuoripumppauksen ja Raman-vahvistuksen käyttö.



Työn tarkoitus oli tutkia optisen WDM-verkon soveltuvuus kaupunkialueelle. Tavoite saavutettiin rakentamalla koeverkko ja demonstrointi osoittaa, että kaupunkialueen syöttöverkko on mahdollista toteuttaa läpinäkyvästi WDM-tekniikkaa hyväksikäyttäen.

**Taulukko 4. Komponenttivalmistajien tuoteselosteissa ilmoittamat vaimennukset.**

Komponentti	Selostus	Vaimennus [dB]		Valmistaja
		Max	Typical	
100 GHz:n kaistapäästö-suodatin	kanavan lisäys	1,2	0,8	Elights
	kanavan pudotus	1,2	0,8	
	heijastuskaista	0,6	0,35	
200 GHz:n kaistanpäästö-suodatin	kanavan lisäys	1,5	1,2	E-tek
	kanavan pudotus	1,5	1,2	
	heijastuskaista	0,5	0,3	
100 GHz:n vuoroerotin	kaikki kanavat	1,6	1,2	Oplink
Mekaaninen 2x2 kytkin	oletustila	1,0	0,6	Dicon
	ristitila	1,0	0,6	
Haaroittimet	10%	0,55 / 10,6	0,5 / 10,0	FOCI
	30%	1,65 / 5,6	1,5 / 5,5	
	50%	3,2	3,0	
Standardi-yksimuotokuitu	dB/km	0,2	0,2	NK Cables
Siirtolinkki	kuitu + kuituhitsaukset + liittimet dB/km	0.5 /km	0.25 /km	
8 kanavainen multi/demultiplekseri	mux	4,0	3,6	JDSU
	dmux	3,7	3,3	
Vaimennin	kytkentähäviöt	1,0	0,6	E-TEK

**Taulukko 5. Kanavien tehohäviöt.**

Kanava	Lisäys-solmu	Pudotus-solmu	Häviöt [dB]			
			myötäpäivään		vastapäivään	
			Max	Typical	Max	Typical
25	LT* 3	Keskitin	29.55	23.9	35.7	28.8
27	LT 3	Keskitin	29.05	23.6	36.2	29.1
29	LT 2	Keskitin	32.35	25.3	29.9	25.25
31	LT 1	Keskitin	42.2	35.55	25.55	22.4
33	Keskitin	LT 3	41.9	31.8	26.75	23.3
		Keskitin	-	-	-	-
35	Keskitin	LT 3	41.4	31.5	27.25	23.6
		Keskitin	-	-	-	-
37	Keskitin	LT 2	31.1	24.45	29.8	24.1
		Keskitin	-	-	-	-
39	Keskitin	LT 1	26.85	22.7	31.4	25.45
		Keskitin	-	-	-	-

\* Linjaterminaali

**Tehobudjettilaskuissa käytetyt haaroitussuhteet (myötäpäivään/vastapäivään)**

LT 1: lähetys 90/10, lisäys 10/90

LT 2: lähetys 50/50, lisäys 50/50

LT 3: lähetys 10/90

Keskitin: lähetys Ch33 ja Ch35 90/10,  
lähetys Ch39 10/90, lähetys Ch37 50/50

## Lähdeluettelo

- [Ram+98] R. Ramaswami ja K.N. Sivarajan, "Optical Networks: A practical perspective", Morgan Kaufmann Publishers, 1998.
- [Agr95] G. P. Agrawal, "Nonlinear Fiber Optics", Academic Press, 1995.
- [Agr97] G. P. Agrawal, "Fiber-Optic Communication Systems", John Wiley & Sons, s. 18, 39, 41, 56, 60, 63, 86, 93, 104-105, 296-302, 361, 369, 371, 1997.
- [Bja93] A. Bjarklev, "Optical fiber amplifiers: Design and system applications" Artech House, 1993.
- [Bra+88] C. Brain ja P. Cochrane, "Wavelength-routed optical networks using coherent transmission", ICC'88, 1988.
- [Des94] E. Desurvire, "Erbium doped fiber amplifiers: Principles and applications", John Wiley & Sons, 1994.
- [Dia90] P. Diamant, "Wave transmission and fiber optics", Macmillan, 1990.
- [Dub02] S. E. Dubner et al., "A collection-distribution network for a metropolitan area optical network testbed", OFC'02, paperi ThH3, 2002.
- [Fro+00] N. M. Froberg et al., "The NGI ONRAMP test bed: Reconfigurable WDM technology for next generation regional access network", *IEEE J. Lightwave Technol.*, osa 18, n. 12, s. 1697-1708, 2002.
- [FSE12/01] FibreSystems Europe, osa 5, n. 12, s. 34, 2001.
- [FSE2/02] FibreSystems Europe, osa 6, n. 2, s. 17, 2002.
- [Gol+94] E. L. Goldstein et al., "Performance implications of component crosstalk in transparent optical networks", *IEEE Photon. Tech. Lett.*, osa 6, n. 5, s. 657-660, 1994.
- [Gor83] J.P. Gordon, *Optic. Lett.*, osa 8, s. 596, 1983.
- [Gus+97] M. Gustavsson et al., "Statistical analysis of interferometric crosstalk: theory and optical network examples", *IEEE J. Lightwave Technol.*, osa 15, n. 11, s. 2006-2019, 1997.
- [Hii98] O.-P. Hiironen, "Optinen kuituvahvistin ja vastaanotin aallonpituuskanavoidussa tiedonsiirtojärjestelmässä", diplomityö, s. 46, TKK, Teknillisen fysiikan ja matematiikan osasto, 1998.
- [Hil88] R. Hill, "A wavelength routing approach to optical communications networks", *Proc. IEEE Infocom'88*, p. 354-362, 1988.
- [Hil+95] H. Hillmer et al., *IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron.*, osa 1, s. 356, 1995.
- [Ish+95] H. Ishii et al., *IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron.*, osa 1, s. 401, 1995.
- [Ish+96] G. Ishikawa et al., "10 Gb/s optical transmission systems using modulator integrated DFB lasers with chirp optimizing", ECOC'96, paperi WeP.09, 1996.
- [ITU G.957] International Telecommunication Union, suositus G.957, "Digital transmission systems – Digital sections and digital line systems – Digital line systems", 1998.
- [Joh+98] S. Johanson et al., "A cost-effective approach to introduce an optical WDM



- network in the metropolitan environment”, *IEEE Journal on Sel. Areas in Comm.*, osa 16, n. 7, 1998.
- [Kai02] A. Kaikkonen, “Automatisoitu mittauskytkentä erbiumseostetun kuidun karakterisointiin”, optoelektroniikan erikoistyö, TKK, Sähkö- ja tietoliikennetekniikan osasto, 2002.
- [Kao+66] K. Kao ja A. Hockham, “Dielectric-fiber surface waveguides for optical frequencies”, *Proc. IEEE*, 113(7), s. 1151-1158, 1966.
- [Kaw+99] S. Kawanishi et al., “3 Tbit/s (160 Gbit/s  $\times$  19 channel) optical TDM and WDM transmission experiment”, *Electron. Lett.*, osa 35, n. 10, 1999.
- [Kuh97] D. R. Kuhn, “Sources of failures in the public switched telephone network”. *IEEE Comp. Mag.*, huhtikuu, 1997.
- [Kuz+00] M. Kuznetsov et al., “Next generation optical regional access network”, *IEEE Commun. Mag.*, osa 38, tammikuu, s. 66-72, 2000.
- [Lan+02] K-L. Langer et al, “Overview and recent developments of the German R&D initiative KomNet”, ICTON, paperi Th.B.3, 2002.
- [Lei+99] P. Leisching et al., “Optical add/drop multiplexers for dynamic channel routing”, *Electron. Lett.*, osa 35, s. 591-92, 1999.
- [Mea+87] J. Mears et al., “Low-noise erbium-doped fibre amplifier operating at 1.54  $\mu\text{m}$ ” *Electron. Lett.*, osa 19, n. 23, s. 1026, 1987.
- [Mor01] O. Morales, “IP over Ethernet via fiber”, *IT Proff.*, osa 3, s. 43-45, 2001.
- [Oks+02] M. Oksanen et al., “Spectral slicing passive optical access network trial”, OFC’02, paperi ThH2, 2002.
- [Sal+99] M. Saleh ja M. Simmons, “Architectural principles of optical regional and metropolitan access networks”, *IEEE J. Lightwave Tech.*, osa 17, num. 12, 1999.
- [Sat+96] K. Sato et al., *Appl. Phys. Lett.*, osa 69, s. 2626, 1996.
- [Sin95] J. Singh, “Semiconductor Optoelectronics, Physics and Technology”, McGraw-Hill, 1995.
- [Sri+96] A. K. Srivastava et al., “The fast gain control in erbium-doped fiber amplifier”, *Optical amplifiers and their applications*, osa V, 1996 Trends in optics and photonic series, OSA, 1996.
- [Ste+99] E. Stern ja K. Bala, “Multiwavelength optical networks, a layered approach”, Addison-Wesley, 1999.
- [Sto+01] D. Stoll, et al., “Metropolitan DWDM: A dynamically configurable ring for the KomNet field trial in Berlin”, *IEEE Comm Mag.*, helmikuu, 2001.
- [Sve95] O. Svelto, “Principles of Lasers”, Plenum Press, 1995.
- [Tom+01] I. Tomkos et al., “Demonstration of negative dispersion fibers for DWDM metropolitan area networks”, *IEEE J. on Sel. Top. Quantum. Elec.*, osa 7, n. 3, 2001.
- [Ulr+79] R. Ulrich ja A. Simon, “Polarization optics of twisted single-mode fibers”, *Applied Optics*, osa 18, n. 13, s. 2241-2251, 1979.

- [Wu92] T-H. Wu. "Fiber network service survivability", Norwood, MA: Artech House, 1992.
- [Ylä99] K. Yläjarkko, "Multiple reflections and optical fiber amplifiers in optical networks", diplomityö, s. 42, TKK, Teknillisen fysiikan ja matematiikan osasto, 1999.
- [Zir93] M. Zirngibl, "Gain control in erbium-doped fiber amplifiers by an all-optical feedback loop", Electron. Lett., osa 29, s. 1112-1113, 1993.
- [Zys+96] J. L. Zyskind et al., "Fast link control protection for surviving channels in multiwavelength optical networks", ECOC'96, 1996.